

**Alternative Verfahren zur Oberflächenbearbeitung metallischer  
Dentalmaterialien. Experimentelle Untersuchung zum Einfluss auf  
Oberflächenzustand und Mikrostruktur.**

**DISSERTATION**

zur Erlangung des akademischen Grades  
doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)

vorgelegt dem Rat der Medizinischen Fakultät  
der Friedrich - Schiller - Universität

von Ulrike Lenz  
geboren am 11.09.1974 in Jena

## **Gutachter**

- 1. Prof. Welker, Jena**
- 2. Prof. Hoyer, Jena / Erfurt**
- 3. Prof. Wirz, Basel**

Tag der öffentlichen Verteidigung: 05.11.2002

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1.</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>GRUNDLAGEN</b>	<b>5</b>
2.1.	Auswahl und Einsatz metallischer Werkstoffe in der Zahnmedizin	5
2.1.1.	Auswahlkriterien metallischer Werkstoffe	5
2.1.2.	Charakterisierung praxisrelevanter metallischer Dentalwerkstoffe	6
2.1.2.1.	Edelmetallfreie Legierungen <ul style="list-style-type: none"><li>• Co-Basislegierungen</li><li>• Titan</li></ul>	6
2.1.2.2.	Edelmetalllegierungen <ul style="list-style-type: none"><li>• Hochgoldhaltige Legierungen</li></ul>	11
2.2.	Grenzflächenverhalten metallischer Werkstoffe im biologischen Milieu	13
2.3.	Grundlagen und allgemeine Technologie der Oberflächenbearbeitung	16
2.3.1.	Aufgaben der Oberflächenbearbeitung	16
2.3.2.	Oberflächen – Fertigungsverfahren	17
2.3.3.	Systematik und Anwendung der Strahlverfahren	19
2.3.4.	Strahlmittel	23
2.3.5.	Kugelstrahlen und alternative Verfahren	24
2.4.	Spezielle Verfahren der Oberflächenbearbeitung	27
2.4.1.	Mikrostrahlen	27
2.4.2.	Magnet-abrasive Nassverfahren	28
<b>3.</b>	<b>ZIELSTELLUNG</b>	<b>29</b>
<b>4.</b>	<b>MATERIALIEN UND METHODEN</b>	<b>30</b>
4.1.	Untersuchte Materialien	30
4.1.1.	Vorstellung der Materialien	30
4.1.2.	Herstellung der Prüfkörper	30
4.1.3.	Vorbereitung der Prüfkörper	31

4.2.	Geräte und Verfahren	31
4.2.1.	Micro-Finishing	31
4.2.1.1.	Gerätebeschreibung	31
4.2.1.2.	Strahlmedien	32
4.2.1.3.	Methodik	32
4.2.2.	Ecoclean-Verfahren	34
4.2.2.1.	Gerätebeschreibung	34
4.2.2.2.	Glanzbäder und Nadeln	34
4.2.2.3.	Methodik	36
4.3.	Theoretische Grundlagen der Untersuchungsmethoden	37
4.3.1.	Bestimmung der Oberflächengeometrie	37
4.3.2.	Mikrohärtemessung	38
4.3.3.	Lichtmikroskopische Untersuchung	39
4.3.4.	Rasterelektronenmikroskopie	40
4.3.5.	Lichtreflexionsvermögen	40
4.3.6.	Metallographie	41
4.4.	Prüfmethoden	41
4.4.1.	messtechnische Untersuchungen	41
4.4.1.1.	Profilographische Untersuchungen	41
4.4.1.2.	Mikrohärte	42
4.4.1.3.	Glanzgrad	42
4.4.2.	bildgebende Untersuchungen	43
4.4.2.1.	Auflichtmikroskopische Untersuchungen (Lichtmikroskopie)	43
4.4.2.2.	Untersuchungen im Rasterelektronenmikroskop (REM)	43
4.4.2.3.	Metallographie	43
4.5.	Statistische Überprüfung	45
<b>5.</b>	<b>ERGEBNISSE</b>	<b>46</b>
5.1.	Micro-Finishing	46
5.1.1.	metrisch erfassbare Größen	46
5.1.1.1.	Profilanalyse	46
5.1.1.2.	Glanzgrad	54
5.1.1.3.	Mikrohärte	56
5.1.2.	bildgebende Untersuchungen	61
5.1.2.1.	Lichtmikroskopie	61

5.1.2.2.	REM	62
5.1.2.3.	Metallographie	67
5.2.	Ecoclean	70
5.2.1.	metrisch erfassbare Größen	70
5.2.1.1.	Profilanalyse	70
5.2.1.2.	Glanzgrad	74
5.2.1.3.	Mikrohärte	75
5.2.2.	bildgebende Untersuchungen	76
5.2.2.1.	Lichtmikroskopie	76
5.2.2.2.	REM	79
5.2.2.3.	Metallographie	81
6.	<b>DISKUSSION</b>	<b>83</b>
6.1.	Diskussion der Untersuchungsmethoden	83
6.2.	Diskussion der Ergebnisse	85
6.2.1.	Goldlegierung	85
6.2.1.1.	Grundzustand	85
6.2.1.2.	Vorgeschliffene Oberfläche	87
6.2.2.	Kobaltbasislegierung	88
6.2.2.1.	Grundzustand	88
6.2.2.2.	Vorgeschliffene Oberfläche	90
6.2.3.	Titan	91
6.2.3.1.	Grundzustand	91
6.2.3.2.	Vorgeschliffene Oberfläche	95
6.3.	Klinische und technologische Relevanz	96
7.	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>99</b>
Literaturverzeichnis		
Anhang		
Ehrenwörtliche Erklärung		
Danksagung		
Lebenslauf		

## 1. EINLEITUNG

Metallische Dentalmaterialien werden in der Zahnmedizin zur Wiederherstellung von zerstörten oder/und verlorenen Zähnen in Form von festsitzendem, abnehmbarem und kombiniertem Zahnersatz verwendet. Trotz der Entwicklung neuer Werkstoffe und Technologien wie Hochleistungskeramiken und verschiedene CAD/CAM Verfahren, erscheinen metallische Dentalmaterialien auch in Zukunft unentbehrlich. Sie zeigen mechanische Eigenschaften, die für diese Materialgruppe spezifisch sind. Zu nennen sind hohe Festigkeit, Steifigkeit und Elastizität, gekennzeichnet durch hohe Werte für Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul und Dehngrenze. Metallische Werkstoffe sind verwindungsstabiler, widerstandsfähiger gegenüber mechanischer Belastung und reagieren auf Überlastungen mit einer plastischen Verformung sowie Festigkeitssteigerung, während andere Materialien (z.B. Keramik) spröder sind und eher brechen. Die Versorgung mit metallfreiem Zahnersatz bringt zudem den Nachteil einer stärker invasiven Präparation oder muss zu Lasten der Funktionalität voluminöser gestaltet werden [Kappert 1992, Schwickerath 1993].

Die Formgebung von metallischen Dentalmaterialien erfolgt vorwiegend durch Vergießen des schmelzflüssigen Metalls. Die Gießtechnologien wurden in den zurückliegenden Jahren wesentlich verbessert (z.B. Vakuumdruckguss unter Schutzgas), so dass Struktur und Präzision von Gussobjekten den klinischen Anforderungen weitgehend gerecht werden. Dennoch treten Grenzflächenreaktionen mit der Atmosphäre und der Gussformmasse auf, die zu Oxidauflagerungen und Aufnahme von Fremdstoffen führen. Diese machen eine aufwändige Oberflächenbearbeitung durch sogenanntes „Sandstrahlen“ (Reinigungsstrahlen) und mit unterschiedlichen rotierenden Instrumenten erforderlich. Im Ergebnis können Gefügestörungen in den Randschichten der Objekte entstehen und Oberflächenrauigkeiten zurückbleiben. Als Folge kann das Grenzflächenverhalten gegossener metallischer Therapiemittel im Mundmilieu nachteilig beeinflusst werden: die Korrosionsanfälligkeit (Lokalelementbildung) und die Adhäsion von Biofilmen nehmen zu.

Eine Optimierung und Rationalisierung der Oberflächenbearbeitung von Gussobjekten für zahnmedizinische Indikationen ist daher von besonderer klinischer und technologischer Bedeutung.

## 2. GRUNDLAGEN

### 2.1. Auswahl und Einsatz metallischer Werkstoffe in der Zahnmedizin

#### 2.1.1. Auswahlkriterien metallischer Werkstoffe

Metallische Dentalmaterialien werden meist über einen längeren Zeitraum in der Mundhöhle eingegliedert und unterliegend dort den mikrobiologischen, mechanischen, thermischen und elektrochemischen Einflüssen des Mundmilieus. Die indikationsgerechte Werkstoffauswahl muss durch den Zahnarzt erfolgen, ihm obliegt entsprechend des Medizinproduktegesetzes die Verantwortung über das eingegliederte Therapiemittel. Die an metallische Dentalmaterialien gestellten Forderungen für den klinischen Einsatz können in die Bereiche biologische, klinisch-mechanische und technologische Anforderungen unterteilt werden. Die grundlegende Voraussetzung für die Auswahl eines Werkstoffs ist dessen *biologische Verträglichkeit*. Nach Eingliederung in die Mundhöhle muss eine geringe Löslichkeit ohne Freisetzung toxischer Legierungselemente gefordert werden. Neben der möglichen lokal-toxischen Wirkung von aus dem Legierungsgefüge austretenden Ionen ist deren systemischer Einfluss in Form allergisierender Faktoren zu beachten.

Die Korrosionsbeständigkeit kann durch in vitro- Untersuchungen nachgewiesen werden. Um jedoch die in vivo- Belastungen eingegliedelter Versorgungen hinreichend untersuchen zu können, müssen die Bedingungen des biologischen Milieus der Mundhöhle simuliert werden. Dazu gehört vor allem die Simulation organischer Deckschichten, sog. Biofilme. Die Bildung organischer Deckschichten (Pellikel, Plaque) auf Festkörpern in der Mundhöhle ist durch organische und anorganische Speichelbestandteile sowie Mikroorganismen und Speisereste gekennzeichnet. Durch das anaerobe Milieu und den Plaquestoffwechsel sinkt der pH-Wert bis zu 4,0, wodurch die Metallionen- und Elektronenbildung (Biokorrosion) gefördert wird (Verhinderung der Ausbildung passivischer Deckschichten, Säurekorrosion, Spaltkorrosion) [Lenz et al. 1995, Wataha 2000].

Infolge adäquater, vergleichender Studien sind Cu-, In- und Ga- freie hochgoldhaltige Legierungen, CoCrMo- Legierungen und Titan bei fachgerechter Ver- und Bearbeitung (siehe unten) als biologisch unbedenklich einzustufen und für die klinische Anwendung empfohlen [Lenz 2000, Wirz 1993 und 1995].

Die *klinisch-mechanischen Anforderungen* an einen metallischen Werkstoff sind in Abhängigkeit von dem Indikationsbereich sehr unterschiedlich. Ihnen wird durch die Kombination verschiedener mechanischer Werkstoffeigenschaften entsprochen:

- Härte: eine große Härte bewirkt eine hohe Verschleißfestigkeit, wie sie z.B. bei Geschiebekonstruktionen gefordert wird, wogegen sie bei der spanabhebenden Bearbeitung hinderlich ist.

- Elastizitätsmodul: ist das Maß für Steifigkeit und Biegefestigkeit, ein hoher E-Modul ist für eine grazile Gestaltung von gegossenen Klammern und Gussgerüsten abnehmbarer Teilprothesen und Brückenkonstruktionen notwendig.
- 0,2% Dehngrenze: zeigt an, ab welcher Beanspruchung nicht mehr eine elastische, sondern plastische Verformung hervorgerufen wird (Duktilität). Sie ist ebenfalls für die Bruchfestigkeit von gegossenen Klammerarmen, deren Aktivierbarkeit und für die Stabilität weitspanniger Brücken wichtig [Schwickerath 1985, 1993].

Die *technologischen Aspekte* bei der Legierungsauswahl beziehen sich im wesentlichen auf die Ver- und Bearbeitung metallischer Werkstoffe und betreffen somit vorwiegend den zahntechnischen Bereich. Kennzeichnend sind Werkstoffparameter wie Schmelzintervall (Gießbarkeit), feste Schwindung (Passgenauigkeit der Gussobjekte), Warmfestigkeit und Wärmeausdehnungskoeffizient (Keramikaufbrand); weiterhin Härte, E-Modul und Bruchdehnung (Zerspan- und Finierbarkeit). Aber nicht nur die werkstoffkundlichen Parameter, sondern auch ein fachgerechter Umgang mit metallischen Dentalmaterialien ist für einen optimalen und für den Patienten unbedenklichen Einsatz unabdingbar. Durch Verarbeitungsfehler, beispielsweise bei der Gusstechnologie, können Lunker, Oberflächenfehler oder Entmischungen in Legierungen entstehen, wodurch mit einer verminderten mechanischen Stabilität bzw. Korrosionsanfälligkeit (Lokalelement) gerechnet werden kann [Lenz 2000, Schwickerath 1985].

Die Herstellung gegossener metallischer Konstruktionen in der dentalen Technologie erfolgt nach dem Wachsausschmelzverfahren, welches seit Anfang des letzten Jahrhunderts in Anwendung ist. Formmasse und Gussbedingungen sind entscheidend für das Gussergebnis. Die Oberfläche eines nach optimalen Bedingungen gegossenen Objektes ist aber noch weit von den Kriterien einer idealen Oberfläche entfernt und bedarf einer weiteren mechanischen Bearbeitung. Auf Grundlagen und Methoden der mechanischen Oberflächenbearbeitung soll im Kapitel 2.3.1. eingegangen werden.

### 2.1.2. Charakterisierung praxisrelevanter metallischer Dentalwerkstoffe

In Hinblick auf die biologischen, mechanischen und technologischen Anforderungen an metallische Dentalmaterialien können hochgoldhaltige (Cu-, In-, Ga- freie) Legierungen, Kobaltbasislegierungen, Titan und elektrochemisch abgeschiedenes Feingold als metallische Werkstoffe für die zahnärztliche Therapie empfohlen werden. Mit diesen Materialgruppen können alle Indikationsbereiche abgedeckt werden. Sie sollen im Folgenden entsprechend der Unterteilung in edelmetallfreie- und Edelmetalllegierungen näher charakterisiert werden.

#### 2.1.2.1. Edelmetallfreie Legierungen

Nichtedelmetalle stehen in der elektrochemischen Spannungsreihe links vom Wasserstoff (dessen Standardpotential als Null definiert ist) und besitzen somit ein negatives Potential. Sie sind reaktionsfreudig, werden an der Luft leicht oxidiert und lösen sich in



nichtoxidierenden Säuren, sind also nicht korrosionsbeständig. Einige Nichtedelmetalle aber besitzen die Eigenschaft, chemisch und elektrochemisch inerte Deckschichten auszubilden (die sogenannte Passivierung). Zu diesen Elementen gehören u.a. Aluminium, Titan und Chrom.

Die Verwendung edelmetallfreier Legierungen in der Zahnmedizin hat eine lange Tradition. Die ersten Arbeiten wurden bereits Mitte des 19. Jahrhunderts in Form von Aluminium-Basisplatten eingegliedert. Es folgte Anfang des 20. Jahrhunderts der Einsatz von NiCr-Stahl zur Herstellung von Klammern, Bügeln und Basisplatten (Wipla; Hauptmeyer 1919). Anfang der 30er Jahre wurde in den USA eine CoCrWo-Legierung entwickelt (Vitallium; Erdle und Prange 1932) [Geis-Gerstorfer 1996, Kappert et al. 1999, Lenz 1985, 1991, 1998].

Zu den heute wichtigsten edelmetallfreien Dentallegierungen gehören die Kobaltbasislegierungen und das Titan. Die Anwendung von Eisenbasislegierungen (CrNi-Stähle) und Nickelbasislegierungen ist aufgrund ungünstiger werkstoffkundlicher Parameter und mangelnder Biokompatibilität nicht zu empfehlen [Kappert et al. 1999, Lenz 1998, Ludwig 1994, Wirz 1993, 1995].

Im Folgenden sollen die Kobaltbasislegierungen und das Titan näher charakterisiert werden.

### **Kobaltbasislegierungen**

Hauptbestandteile jeder heute verwendeten Kobaltbasislegierung sind die Elemente Kobalt, Chrom und Molybdän. Das Kobalt erzielt die notwendige Härte und Festigkeit und soll in einem prozentualen Masseanteil von 62 – 67% in der Legierung vorhanden sein. Die Bedeutung des Chroms liegt in der Passivierung: soll eine Kobaltbasislegierung korrosionsbeständig sein, so ist ein Anteil von etwa 30% Chrom erforderlich. Ein Anteil von ca. 4,5 – 6% Molybdän bewirkt eine Stabilisierung des Gefüges und unterstützt die Korrosionsbeständigkeit.

Vergleichende Prüfungen der anodischen Polarisation zeigten für Kobaltbasislegierungen Durchbruchspotentiale, die im neutralen Elektrolyten in einem Bereich von 800mV lagen und den Lochfraßpotentialen hochgoldhaltiger Legierungen entsprachen. Auffällig ist, dass der Widerstand der CoCrMo-Legierungen gegen elektrochemische Auflösung, erkennbar an höheren Durchbruchpotentialen, im sauren Milieu größer ist. Dies hat eine ausgeprägte Beständigkeit gegen Spaltkorrosion und Biokorrosion bei Plaqueakkumulation (pH-Wert-Abfall) zur Folge.

Weitere Legierungszusätze von Mn, Si, C, N und Ti modifizieren die Eigenschaften beziehungsweise verbessern die Verarbeitbarkeit [Kappert et al. 1999, Lenz 1985, 1991, 1998, 2000, Ludwig 1994, Wall 1998].

Die mechanischen Eigenschaften der Kobaltbasislegierungen sind nicht nur aus ihrer Zusammensetzung, sondern auch durch Besonderheiten der Legierungsbildung zu erklären. Die Gefügematrix, bestehend aus Kobalt und Chrom, liegt unterhalb des Schmelzpunktes in einer weichen und duktilen, kubisch - raumzentrierten  $\gamma$ -Phase vor. Eine weitere Abkühlung

bewirkt bei 417°C eine Phasenumwandlung zu der härteren, weniger duktilen, hexagonalen  $\varepsilon$ -Phase (Umwandlungshärtung). Durch Legierungszusätze von Mo, W und Si kann die  $\varepsilon$ -Phase stabilisiert, durch Zusätze von Ni die Ausbildung der  $\gamma$ -Phase begünstigt werden. Bei der sogenannten Ausscheidungshärtung bewirkt ein in der Schmelze gelöster Kohlenstoffanteil ( $\leq 0,5\%$ ) bei Abkühlung die Ausbildung von Metallkarbiden, welche sich vorwiegend an den Korngrenzen abscheiden. Diese erzielen weitere Gefügeverspannungen, wodurch die Zugfestigkeit und Dehngrenze zunehmen. Bei höherem Kohlenstoffanteil ( $> 0,5\%$ ) wird die Legierung zwar härter, aber weniger duktil. Zudem bewirkt die überwiegende Karbidbindung von Cr und Mo eine Verringerung der Korrosionsbeständigkeit [Geis-Gerstorfer 1996, Greiner 1979, Lenz 1991, 1998, Mohammed und Asgar 1973].

Anfang der 80er Jahre wurden die Kobaltbasislegierungen soweit modifiziert, dass sie auch für die Verblendtechnologie anwendbar wurden. Eine deutliche Verringerung des Kohlenstoffanteils bewirkt eine Verringerung der Härte und die Ausbildung eines gleichmäßigeren Gefüges sowie eine geringere Verarbeitungsempfindlichkeit. Durch Zusätze von Ce, Nb und La wurde der thermische Ausdehnungskoeffizient und die mechanische Bearbeitbarkeit den Anforderungen metallkeramischer Kronen- und Brückentechnologie angepasst [Lenz 1998, 2000, Ludwig 1994, Wall 1998].

Hinsichtlich der dentalen Laboriumstechnologie weisen Kobaltbasislegierungen materialspezifische Probleme auf. Diese haben ihre Ursache in ihrem hohen Schmelzintervall (1350-1400°C), der hohen festen Schwindung ( $>2,0\%$  lin) und der großen Härte (HV10 350-400). Als Folge weisen Gussobjekte Oberflächenstörungen durch Sinterprozesse und Oxidauflagerungen auf und zeigen häufig Mängel in der Präzision. Sie erfordern aufwändige Oberflächenbearbeitung, die durch die Härte der Legierung erschwert ist [Hohmann 1984].

Die traditionelle Indikation der Kobaltbasislegierungen ist die Herstellung abnehmbarer Prothesengerüste ("Modellgusslegierung"). Durch Modifizierung der Kobaltbasislegierungen besteht aber auch die Möglichkeit, sowohl festsitzende Konstruktionen (verblendet und unverblendet), abnehmbare prothetische Arbeiten sowie Kombinationsarbeiten in der Ein-Material-Versorgung anzufertigen. Trotz der genannten technologischen Probleme kann - bei entsprechendem Zeitaufwand - ein optimales Endergebnis erzielt werden [Duncanson 1976, Lenz 1966, 1991, 2000].

## **Titan**

Das Element Titan steht in der vierten Nebengruppe des Periodensystems und zählt somit zu den Übergangselementen. Es ist chemisch sehr reaktiv. Eine besonders hohe Affinität besteht zu Sauerstoff. Mit diesem bildet es innerhalb kürzester Zeit eine oxidische Deckschicht, welche chemisch inert und nicht leitend ist. Auf dieser Eigenschaft beruht die elektrochemische Passivität und demzufolge die ausgesprochene Biokompatibilität des Titans. Titan ist der jüngste in der dentalen Technologie verwandte metallische Werkstoff

und wird als Legierung, vorwiegend jedoch als reines Metall eingesetzt [Lenz 1998, Marx und Baumann 1992, Wirz 1994, Wirz et al. 1995].

In der Natur kommt Titan in verschiedenen Mineralien vor (Rutil-TiO<sub>2</sub>, Ilmenit-FeTiO<sub>3</sub>, Anatas-TiO<sub>2</sub>, Sphen-CaTiSiO<sub>5</sub>), aus welchen zur industriellen und dentalen Verarbeitung Titan technischer Reinheit über eine Bearbeitungskaskade reduziert werden muss. Titan technischer Reinheit wird nach DIN in vier Grade eingeteilt. Diese unterscheiden sich in prozentualen Masseanteilen von Fe (0,15 bis 0,3%) und Sauerstoff (0,12 bis 0,35%), während Titan immer zu 99% vorhanden ist. Mit zunehmendem Anteil von Fremdelementen verändern sich die werkstoffkundlichen Eigenschaften - das Titan wird härter und spröder. Für die Verarbeitung in der dentalen Technologie empfiehlt sich Titan des Reinheitsgrades 1 (geringster Anteil von Fremdelementen) [Päßler und Mann 1991, Zwicker 1974].

Titan kann zwei unterschiedliche Gitterstrukturen ausbilden: die kubisch raumzentrierte  $\beta$ -Phase, welche bei hohen Temperaturen vorliegt und sich bei 882°C unter einer Volumenkontraktion und Veränderung physikalischer Eigenschaften in die hexagonale  $\alpha$ -Phase umwandelt. Da beide Gitterformen durch spezifische Elemente stabilisiert werden können, ist es möglich,  $\alpha$ - $\beta$ -Mischkristalllegierungen zu bilden (z.B. Ti6Al4V -  $\alpha$ -Stabilisierung durch Al;  $\beta$ -Stabilisierung durch V) [Lenz und Lenz 2002, Simon 1982, Thoma 1982].

Die herausragenden werkstoffkundlichen Eigenschaften des Titans sind:

- geringes spezifisches Gewicht (Herstellung leichter Konstruktionen bei geringem Materialverbrauch)
- eine hohe spezifische Festigkeit (günstiges Verhältnis von Festigkeit und Masse)
- eine sehr gute Korrosionsbeständigkeit, auch im aggressivem Milieu (durch Ausbildung passivierender Deckschichten)
- eine geringe Wärmeleitung (pulpaschonend bei prothetischer Versorgung vitaler Zähne)
- ein geringer Wärmeausdehnungskoeffizient (präzise Güsse durch eine geringe feste Schwindung nach dem Guss)
- hoher Schmelzpunkt (hohe Warmfestigkeit beim Keramikaufbrand)
- Röntgentransluzenz aufgrund niedriger Kernladungszahl (Absicherung lunkerfreier Güsse, Röntgendiagnostik von Sekundärkaries)

[Hopp et al. 1995, Jäger und Wirz 1995, Kappert 1994, Küpper 1992, Lenz 1998, Lubberich 1995, Päßler und Mann 1991, Ringke et al. 1992, Simon 1982].

Durch die hohe Affinität des Titans zu Sauerstoff ergeben sich zahlreiche technologische Schwierigkeiten, welche zu einer immer noch nicht uneingeschränkten Akzeptanz des Werkstoffs in der dentalen Technologie führen. Probleme in der Ver- und Bearbeitung von Titan treten vor allem bei höheren Temperaturen infolge verstärkter Reaktionsfreudigkeit auf. Sie haben ihre Ursache in Grenzflächenreaktionen des Titans mit dem umgebenden Milieu bzw. mit kontaktierenden Stoffen und nehmen in Umfang und Heftigkeit mit Anstieg der Temperatur zu. Bedeutsam sind:

- beim Schmelzen und Gießen die Gasaufnahme (insbesondere Sauerstoff) aus der Restatmosphäre des Gießgerätes und die Reaktion mit Einbettmasse und ggf. Tiegelmateral
- bei der Oberflächenbearbeitung die Diffusion von Sauerstoff in die Bearbeitungsstelle und ggf. die Reaktion mit Bestandteilen (Bindematerialien) der Schleifkörper
- beim Keramikaufbrand die Reaktion mit den Oxiden der Keramikmassen
- beim Laser-Schweißen die Diffusion von Sauerstoff aus der Restatmosphäre der Schweißkammer in die Aufschmelzzone der Schweißfuge.

Ergebnis ist in allen Fällen die Entstehung einer Sauerstoffdiffusionszone, die  $\alpha$ -Kristallstruktur besitzt, hart (HV0,02 bis 800) und spröde ist. Sie wird als  $\alpha$ -case bezeichnet und kann zusätzlich durch Fremdelemente (z.B. aus Einbettmassen, Keramikmassen, Schleifkörpern) angereichert sein.

Verhinderung und Beseitigung der  $\alpha$ -case waren und sind Gegenstand werkstoffkundlicher und technologischer Forschung. Dabei sind die durch die dentale Gusstechnologie bedingten Randschichten und deren Bearbeitung besonders wichtig; sie stehen auch in unmittelbarem Bezug zur Aufgabe der vorliegenden Arbeit. Diese Probleme sollen daher im folgenden erörtert werden:

Titan eignet sich aufgrund seiner geringen Dichte ( $4,5 \text{ g/cm}^3$ ) und der hohen chemischen Reaktivität mit der Umgebung nicht für den klassischen Schleuderguss unter atmosphärischen Bedingungen. Eine deutliche Verbesserung brachte die Einführung des Vakuum-Druckgussverfahrens unter Schutzgasatmosphäre. Unter Evakuierung der Guss- und Schmelzkammer und Spülung mit einem Edelgas (Argon) wird das Titan im Lichtbogen aufgeschmolzen und unter Überdruck des Schutzgases in die Gussform gebracht. Um die thermischen Grenzflächenreaktionen mit der Einbettmasse so gering wie möglich zu halten, war es nötig, Einbettmassen mit reduzierenden Eigenschaften zu entwickeln (sog. Refraktäroxide, z.B. Magnesiumoxid). Durch verbesserte Gusstechnologie und Entwicklung titanspezifischer Einbettmassen konnte die durchschnittliche Dicke der  $\alpha$ -case von vorher 250-300  $\mu\text{m}$  auf etwa 50  $\mu\text{m}$  reduziert werden [Brauner 1992, Hopp und Lange 1997, Klapper und Gehre 1994, Lenz und Dietz 1995, Päßler et al. 1991, Pröbster 1990].

Diese auch mit Fremdelementen angereicherte Schicht muss anschließend mechanisch entfernt werden. Dabei und bei der Formgebung der Gussobjekte durch rotierende Instrumente setzt die harte  $\alpha$ -case den Werkzeugschneiden einen hohen Eindringwiderstand entgegen. Bei der Bearbeitung der Titanoberfläche kommt es zu einem lokalen Temperaturanstieg. Infolge der schlechten Wärmeleitung entsteht ein Hitzestau, durch welchen die Aufnahme von Sauerstoff begünstigt wird. Dessen Folge ist eine Versprödung und Aufhärtung der Oberfläche und meist ein misslungener Versuch der Titanpolitur. Um die Reaktionen mit der Umgebung so gering wie möglich zu halten, ist es erforderlich, mit niedrigen Umdrehungszahlen (max. 10 000 U/min) und geringem Anpressdruck zu arbeiten

sowie Fräser mit spezieller Schneidengeometrie zu verwenden [Andre et al. 1997, Schmidli et al. 1997, Voss 2002].

Aufgrund seiner Biokompatibilität und günstiger mechanischer Eigenschaften kann Titan sowohl für festsitzende, als auch abnehmbare prothetische Versorgung eingesetzt werden und somit den Forderungen der Ein-Material-Versorgung gerecht werden [Kappert 1994, Wirz 1994, Wirz et al. 1994, 1995, 1997].

#### 2.1.2.2. Edelmetalllegierungen

Edelmetalle stehen in der elektrochemischen Spannungsreihe rechts des Wasserstoffs und besitzen ein positives Standardpotential. Sie sind reaktionsträge und schwer oxidierbar. Zu den Edelmetallen gehören Gold (Au), Platin (Pt), Palladium (Pd), Iridium (Ir), Quecksilber (Hg) und Silber (Ag). Letzteres nimmt jedoch eine Sonderstellung ein und wird aufgrund seiner geringen Anlaufbeständigkeit aus korrosionschemischer Sicht nur bedingt den Edelmetallen zugeordnet. Platin, Palladium und Iridium sowie Ruthenium (Ru), Rhodium (Rh) und Osmium (Os) gehören zu der sogenannten Platingruppe (Sammelbegriff für die in der VIII. Gruppe des Periodensystems stehenden Edelmetalle).

Die dentalen Edelmetalllegierungen werden entsprechend dem Element mit dem größten Masseanteil an ihrer Zusammensetzung in folgende Gruppen unterschieden:

- Silberbasislegierungen: sind aufgrund oben angegebenen Grundes den edelmetallreduzierten Legierungen zuzuordnen und werden für den klinischen Einsatz nicht mehr empfohlen.
- Palladiumbasislegierungen: wurden aus wirtschaftlichen Gründen als Alternative zu den Goldlegierungen Mitte der 70er Jahre auf den Markt gebracht, können aber aufgrund ihres elektrochemischen und biologischen Verhaltens nur bedingt empfohlen werden.
- Goldbasislegierungen: sind die in der Zahnmedizin am längsten angewandte Legierungsgruppe und unterteilen sich in hochgoldhaltige Legierungen ( $\text{Au} \geq 70\%$ , Au und Platingruppe  $\geq 75\%$ ) und goldreduzierte Legierungen ( $\text{Au} \geq 50\%$ , Au und Platingruppe  $\leq 70\%$ ). Goldreduzierte Legierungen sind Mitte der 30er Jahre als "Spargolde" auf den Markt gekommen und aus elektrochemischer Sicht nur bedingt biokompatibel [Kappert 1992, Lenz 1998].

Die am häufigsten klinisch angewandten Edelmetalllegierungen sind die hochgoldhaltigen Legierungen und sollen im folgenden näher charakterisiert werden.

#### **Hochgoldhaltige Legierungen**

Gold bzw. Goldlegierungen wurden schon seit dem Altertum für zahnmedizinische Restaurationen verwendet. Die handwerkliche Verarbeitung von Goldlegierungen ist seit dem 19. Jahrhundert bekannt. Seit der Einführung des Wachsausschmelz-Gießverfahrens um 1900 ist es zudem möglich, präzise und individuell gefertigte Goldrestaurationen zu fertigen. Allein aufgrund dieser langen historischen Entwicklung hat die Verarbeitung von

Goldlegierungen einen hohen Stand erreicht, stellt heutzutage kein Problem mehr dar und ist noch für viele Zahnärzte und Zahntechniker das Metall der ersten Wahl bei der prothetischen Versorgung.

Da reines Gold für die Anforderungen des Zahnersatzes zu weich ist, wird es durch das Zulegieren von weiteren Metallen in seinen Eigenschaften modifiziert. Die Zusammensetzung der Legierung bestimmt Härte, Verarbeitbarkeit, Gießbarkeit, die Möglichkeit der Verblendung mit zahnfarbenen Materialien und somit den Indikationsbereich für die klinische Anwendung. Die hochgoldhaltigen Legierungen können je nach Einsatzgebiet in folgende Gruppen unterschieden werden:

1. Nicht aufbrennfähige Legierungen

sind die klassischen "Gold-Platin-Legierungen". Sie enthalten außer Gold Anteile von Silber, Platin, Palladium sowie häufig Kupfer und Zink. Die gute Gießbarkeit und Formfüllung wird durch den Gold- und Silberanteil bestimmt. Ein hoher Goldanteil reduziert die Härte und erhöht die Duktilität (Anwendung bei Gussfüllungen). Um bessere Festigkeitswerte und eine erhöhte Dehngrenze zu erzielen (z.B. für die Herstellung unverblendeter Brücken) wird der Anteil an Pt, Pd und Cu angehoben. Es kann in Goldlegierungen des Typs I (weich) bis Typ IV (extrahart) unterschieden werden. Die Ausbildung eines feinkörnigen und homogenen Gefüges wird ebenfalls durch Pt und Pd sowie Ir und Ru unterstützt.

2. Aufbrennfähige Legierungen

müssen den Anforderungen des Metall-Keramik-Verbundes gerecht werden. Dazu ist eine Solidustemperatur von über 1000°C nötig (ca. 150°C über der Brenntemperatur der Keramik), die durch einen erhöhten Anteil an Pt oder Pd erzielt wird. Diese beeinflussen auch den Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK), welcher ebenfalls der Keramik angepasst sein muss. Um ein feinkörniges und homogenes Gefüge zu erzielen und den chemischen Verbund zwischen Metall und Keramik zu gewährleisten, sind Zusätze von Nichtedelmetallen erforderlich (Zn, Sn, In, Ga, Cu). Da diese Bestandteile jedoch die Korrosionsbeständigkeit herabsetzen können, sollten Anteile vor allem von In, Ga und Cu vermieden und durch Elemente wie Ge, Fe, Ru oder Rh ersetzt werden [Wirz 1993].

3. Universallegierungen

wurden mit der Entwicklung von niedrigschmelzenden Keramiken eingeführt. Sie entsprechen in ihrer Zusammensetzung den klassischen AuPt-Legierungen, wobei der Pt/Pd-Anteil um etwa 10% angehoben wurde, um die nötige Steifigkeit und Härte zu erreichen. Für den chemischen Verbund zur Keramik sind ebenfalls Nichtedelmetalle als Oxidbildner erforderlich.

Die hochgoldhaltigen Legierungen können somit für die Kronen- und Brückentechnologie, für Geschiebe- und Stegkonstruktionen, Primäranker bei Teleskopprothesen und Implantat-Suprakonstruktionen angewendet werden. Bei der Versorgung mit gegossenen

Halteelementen (Gussklammern) und großen Verbindungselementen (Transversalband und Sublingualbügel) stehen sie aber in bezug auf erforderlichen E-Modul, Härte und Dehngrenze den Kobaltbasislegierungen nach [Kappert et al. 1999, Lenz 2000, Stümke 1996, Strietzel 1998].

## 2.2. Grenzflächenverhalten metallischer Werkstoffe im biologischen Milieu

Ein in der Mundhöhle eingegliedertes zahnärztliches Therapiemittel ist ein alloplastischer Festkörper, der den Einflüssen des biologischen Mundmilieus unterliegt. Ein zahnärztlicher Werkstoff zeigt keine biologischen Eigenschaften, kann aber Effekte in biologischen Systemen hervorrufen [Welker 2001]. Entscheidend für den Charakter der Wechselwirkungen zwischen alloplastischem Festkörper und Mundmilieu ist die Oberfläche, die eine Grenzfläche zwischen fester (Metall, Keramik, Kunststoff) und flüssiger (Speichel) Materie darstellt. Da es bei Metallen unter atmosphärischen Bedingungen in der Regel zur Ausbildung oxidischer Deckschichten an der Oberfläche kommt, ist die Biokompatibilität eines metallischen Werkstoffs entscheidend von dem chemischen und mechanischen Verhalten dieser Oxidschicht abhängig. Bei einem biokompatiblen Werkstoff kann von einem passiven/inaktiven Verhalten des Werkstoffs im biologischen Milieu ausgegangen werden [Kasemo 1985].

Um die Grenzflächen objektiv einschätzen und vergleichend bewerten zu können, empfiehlt sich nach Weikart [1960] die gesonderte Betrachtung von Oberflächenbeschaffenheit, Oberflächengestalt und Oberflächenverhalten.

Die *Oberflächenbeschaffenheit* wird durch die chemischen, physikalischen, mechanischen und technologischen Eigenschaften einer Oberfläche charakterisiert. Diese stellen sich u.a. durch (metrisch erfassbare) Größen wie Härte (Mikrohärte nach Vickers), Glanz (Lichtreflexionsvermögen) sowie Farbe, Korrosionsbeständigkeit und Oberflächenenergie dar. Letztere soll im Folgenden näher charakterisiert werden:

Die Oberflächenenergie bzw. Oberflächenspannung (bei Flüssigkeiten) resultiert aus den nicht abgesättigten Molekülkräften an einer Oberfläche. Im Inneren einer Materie ist die Summe aller Wechselwirkungen eines Moleküls mit seiner Umgebung gleich Null. Da an der Oberfläche ein gleichwertiges Nachbarmolekül fehlt, resultiert eine nach innen senkrecht zur Oberfläche wirkende Kraft, die als (freie) Oberflächenenergie bezeichnet wird und eine materialspezifische Größe darstellt. Zahnärztliche Werkstoffe können in Materialien mit hoher und niedriger freier Oberflächenenergie eingeteilt werden. Während weiche Materialien wie Kunststoffe niedrigere Werte ähnlich denen der Flüssigkeiten erreichen, haben harte Werkstoffe mit hohem Schmelzpunkt eine hohe freie Oberflächenenergie [Jendresen und Glantz 1981]. Diese an organischen und anorganischen Oberflächen wirkenden molekularen Kräfte beeinflussen die Benetzbarkeit der Oberfläche und Adhäsion von organischen und anorganischen Bestandteilen, wodurch es in der Mundhöhle zu einer

Pellikelbildung kommt (Adhäsion von organischen Molekülen an der Oberfläche). Die Bindung dieser Bestandteile erfolgt vorwiegend über Van der Waalsche Bindungen, aber auch Dipol-, Wasserstoff- oder Valenz-Ionenbindung [Kasemo 1985]. Die Bindung von organischen und anorganischen Bestandteilen beeinflusst die freie Oberflächenenergie. Infolge dessen erreicht die Oberflächenenergie nach Pellikelbildung an Zahn- sowie Werkstoffoberfläche ähnliche Werte. Der Nachweis der materialunabhängigen Plaqueadhäsion an zahnärztliche Werkstoffe wurde durch Studien von Krekeler und Kappert et al. [1984] sowie Grimm und Georgi [1989] erbracht. Andererseits konnte durch in vivo-Untersuchungen von Glantz [1969], Van Dijk et al. (im Tierexperiment) [1987] und Quiryen et al. [1990] eine Abhängigkeit der Plaquebildung und Plaquereifung von der freien Oberflächenenergie festgestellt werden. Aber auch durch mechanische Bearbeitungsvorgänge kann die Energie der Oberfläche beeinflusst werden [Schmidt 1993].

Die *Oberflächengestalt* umfasst die geometrische Form, stellt also Rauigkeit und Welligkeit einer Oberfläche dar. Sie ist abhängig von der Oberflächenbearbeitung und kann taktil (Profilmessungen) sowie visuell (mikroskopische Untersuchungen) untersucht werden, wobei die taktile Erfassung des Oberflächenprofils objektive Daten ermittelt.

Der kausale Zusammenhang einer rauen Oberfläche und der Adhäsion bzw. Retention von Mikroorganismen ist bereits in zahlreichen experimentellen und klinischen Studien nachgewiesen worden [Bollen et al. 1996, Sandig 1983, Swartz und Phillips 1957, Taylor et al. 1998, Yamauchi et al. 1990]. In einer in vitro-Studie von Taylor et al. [1998] wurden eine CoCr-Legierung und ein Prothesenkunststoff unterschiedlich bearbeitet (Korundstrahlen, Fräsen, Politur, elektrolytische Politur) und mit einer Zellsuspension (*Streptococcus oralis*, *Actinomyces viscosus*, *Candida albicans*) bei 37°C für eine Stunde beschickt. Im Anschluss wurden die haften gebliebenen Zellen ausgezählt. Auffällig war ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Bakterienarten und *Candida albicans*: bei letzterem war eine quantitativ geringere, dafür aber bearbeitungsabhängige Verteilung erkennbar, während Streptokokken und Aktinomyzeten in größerer Zahl adhärten, aber geringere Unterschiede zwischen den Bearbeitungszuständen erkennbar waren. Auch Yamauchi et al. [1990] stellte Unterschiede innerhalb der Bakteriengruppen fest, wobei ebenfalls eine stärkere Aufrauung mit einer erhöhten Retention der Mikroorganismen korrelierte. Daher kann behauptet werden, dass die Oberflächenrauigkeit nicht nur quantitativ, sondern auch qualitativ die Plaqueakkumulation beeinflusst.

Das *Oberflächenverhalten* ergibt sich aus den Eigenschaften von Oberflächenbeschaffenheit und Oberflächengestalt. Es bezeichnet die Auswirkungen der Oberfläche auf die Umgebung, also deren Wechselwirkungen und kennzeichnet ihre Biokompatibilität. Die Ausbildung von Biofilmen und deren Besiedlung mit pathogenen Keimen (Plaquebildung und Plaquereifung) steht in ursächlichem Zusammenhang mit der Entstehung und Progression von Karies, Gingividen, Parodontitiden und Prothesenstomatitiden. Eine die Plaqueadhäsion und Plaquereifung begünstigende Oberfläche kann demzufolge als indirekte Noxe wirken [Budtz-



Jørgensen 1979, Eichner 1975, Jung und Hupfau 1961, Puhar und Egli 1967, Wise und Dykema 1975].

In einer tierexperimentellen Studie von Sherif et al. [1993] konnte der Nachweis eines kausalen Zusammenhanges zwischen Bearbeitungszustand der Oberfläche festsitzender Restaurationen und dem Entzündungsgrad der umgebenden Gingiva erbracht werden. Dazu wurden Kronen unterschiedlicher Materialien (CoCr-Legierung, Keramik) und Bearbeitung (gefräst, Vorpolutur, Hochglanzpolutur) an Hunden eingegliedert und nach drei Monaten Gewebeproben der marginalen Gingiva für histologische Untersuchungen entnommen. Während die Gewebeproben aus regio der hochglanzpolierten Kronen keine Entzündungszellen aufwiesen, wurde das histologische Bild aus regio der gefrästen Kronen durch Entzündungszellen geprägt. Durch weitere Untersuchungen von Bollen und Bollen et al. [1996, 1997] wurde die Theorie eines "Schwellenwert  $R_a$ " aufgestellt und bestätigt. In einer klinischen Studie wurden bakterielle Anhaftung und Kolonisation supra- und subgingival an Implantataufbauten mit unterschiedlichen Oberflächen ( $R_a \geq 0,2 \mu\text{m}$ ) über einen Zeitraum von 12 Monaten untersucht. Im Ergebnis war ersichtlich, dass eine Reduktion der Rauigkeit unter  $R_a = 0,2 \mu\text{m}$  keinen signifikanten Einfluss auf die qualitative und quantitative Plaqueakkumulation hat.

Bei der Betrachtung des Verhältnisses von freier Oberflächenenergie und Rauigkeit auf die Adhäsion und Retention oraler Mikroorganismen konnte durch umfassende Literaturrecherchen von Quirynen et al. [1995] folgendes festgestellt werden: obwohl beide Parameter (freie Oberflächenenergie und Rauigkeit) für die initiale Adhäsion von Bedeutung sind und miteinander interagieren, überwiegt dennoch die bestimmende Wirkung der Oberflächenrauigkeit. Die Zusammenhänge von Adhäsion und Biofilmbildung an Grenzflächen von Festkörpern sollen in der Abbildung 1 verdeutlicht werden.

Bei der Frage nach dem Oberflächenverhalten, also der Biokompatibilität einer Oberfläche, ist neben der Korrosionsbeständigkeit und der hygienefreundlichen Gestaltung (Formgebung) vor allem die Oberflächenbearbeitung (Mikrorauigkeit) von entscheidender Bedeutung.

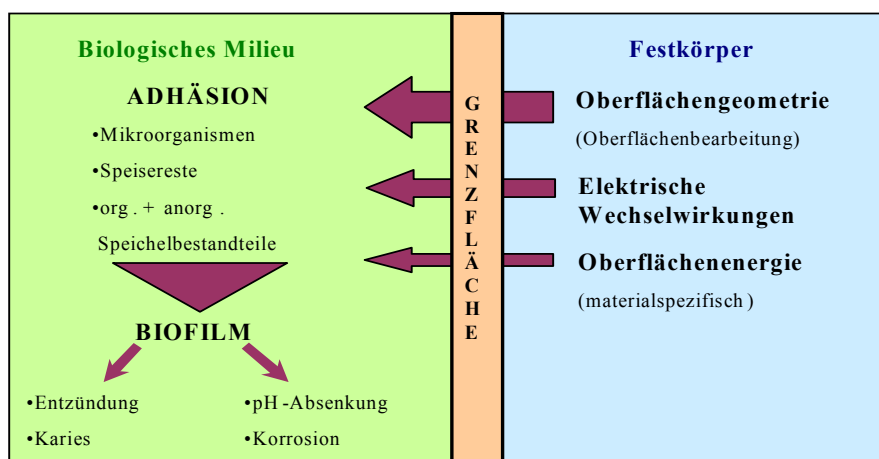


Abb.1: Schematische Darstellung der Einflüsse von Oberflächenparametern auf die Adhäsion und Biofilmbildung an Grenzflächen von Festkörpern im biologischen Milieu

## 2.3. Grundlagen und allgemeine Technologie der Oberflächenbearbeitung

### 2.3.1. Aufgabe der Oberflächenbearbeitung

Die maximal erzielbare Güte bei mechanischer Oberflächenbearbeitung ist die Hochglanzpolitur. Das Ziel der Politur ist es, eine Oberfläche mit extrem geringen Rautiefen und einer hohen Ebenheit zu erzeugen [Hiersig 1995, Jefferies 1998]. Gleichzeitig wird die Widerstandsfähigkeit gegen mechanische, chemische und elektrochemische Prozesse erhöht, sowie eine Verminderung der Haftung von Belägen und Mikroorganismen erreicht [Neumeyer 1984].

Die physikalischen Vorgänge beim Polieren metallischer Oberflächen lassen sich nach *Beilby* (1921) folgendermaßen erklären: Die hohe Reibungswärme der Poliermittel (beziehungsweise deren Trägermedien) bewirkt ein lokales Schmelzen des bearbeiteten Metalls. Der kristalline Charakter des Metalls geht an der Oberfläche verloren und es wird eine flüssige beziehungsweise halbflüssige Schicht über die darunterliegende kristalline Oberfläche verschmiert. Da die Abkühlung dieser flüssigen Schicht sehr schnell erfolgt, behält sie ihren amorphen Charakter bei. Infolgedessen kommt es zu einer Verdichtung und Härtesteigerung an der Oberfläche sowie zu einer Reduktion der Oberflächenrauigkeit und somit Verkleinerung der aktiven Oberfläche. Des weiteren können feinstrukturierte Angriffspunkte für elektrochemische Lösungsvorgänge reduziert werden [Eichner 1985, Krause 1955, Kürten 1960, Lenz und Mann 1985, Neumeyer 1984, Weikart 1960]. Da die hochglanzpolierte Oberfläche einen optimalen, also funktionell und biologisch idealen Oberflächenzustand darstellt, muss folglich geklärt werden, welches der rationellste Weg zum Erreichen dieses Endzustandes ist.

Weikart beschäftigte sich bereits 1960 mit der Auswirkung der einzelnen zahntechnischen Bearbeitungsverfahren auf die Oberflächenqualität und stellte eine Systematik folgender Bearbeitungsgänge zusammen:

1. Grobbearbeitung (Ausarbeiten)
2. Grobschleifen
3. Feinschleifen
4. Feinstschleifen (Vropolieren)
5. Polieren
6. Hochglanzpolieren (Überpolieren).

Mit der Verbreitung edelmetallfreier Legierungen und der Einführung neuer Bearbeitungsverfahren wurde die Oberflächenbearbeitung noch aufwändiger. So empfahl Aydin [1991] für die Bearbeitung von Gussobjekten aus einer Kobaltbasis-Legierung neun Arbeitsschritte, die Strahlverfahren und elektrochemischen Abtrag einschlossen.

Da diese sechs aufeinanderfolgenden Arbeitsgänge mit einem hohen Zeitaufwand verbunden sind, soll im folgenden nach Rationalisierungsmöglichkeiten der Bearbeitungskaskade gesucht werden.

### 2.3.2. Oberflächen-Fertigungsverfahren

Die traditionellen Bearbeitungsmöglichkeiten im zahntechnischen Laboratorium beziehen sich vorwiegend auf die manuelle Bearbeitung mittels rotierender Instrumente. Des weiteren gibt es auch nicht-manuelle Verfahren der Oberflächenbearbeitung, die in ihrer Vielfalt bisher vorwiegend in der industriellen Technologie Anwendung finden.

Zur Übersicht soll zunächst auf die Systematik der Fertigungsverfahren eingegangen werden. Die Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 beschreibt in seiner dritten Untergruppe das Spanen mit geometrisch bestimmten und geometrisch unbestimmten Schneiden. Zu den Spanverfahren mit geometrisch bestimmten Schneiden gehören das Drehen, Bohren, Fräsen, Feilen und Sägen. Dies sind Verfahren, die im zahntechnischen Labor bei der Herstellung individueller Konstruktionen wenig Anwendung finden (Drehen, Feilen, Sägen) beziehungsweise zu den bereits erwähnten rotierenden Bearbeitungsverfahren zählen (Bohren, Fräsen) [Hiersig 1995, König 1996, Weingraber 1989].

Die Spanverfahren mit geometrisch unbestimmten Schneiden können nach DIN 8589 in Verfahren mit gebundenem und mit ungebundenem Korn unterschieden werden. Erstere sind das Schleifen, Honen und Polieren. Auch hier bezeichnen das Schleifen und Polieren die bereits in der dentalen Technologie angewendeten Verfahren. Der Begriff Honen kommt aus dem Englischen und bezeichnet "Feinschleifen". Es ist ein spanendes Endbearbeitungsverfahren mit gebundenem Korn und somit dem in der Zahntechnik angewendeten Vorpolieren mittels Gummipolierer ähnlich.

Zu den Spanverfahren mit ungebundenem Korn gehören das Läppen und Strahlspanen. Das *Läppen* bezeichnet ein

= *Feinbearbeitungsverfahren, bei dem ein Werkstoffabtrag mittels loser, in Flüssigkeit oder Paste verteilter Läppkörner (= Läppgemisch) erfolgt. Dabei werden Werkstückoberfläche und Läppwerkzeug formschlüssig aneinandergeführt und durch mechanische Antriebe relativ zueinander bewegt. Die Läppkörner vollziehen dabei Abrollbewegungen auf ungerichteten Schneidbahnen [Hiersig 1995].*

Diese Definition zeigt, dass der rationelle Einsatz des Läppens vorzugsweise in der industriellen Technik zur kontinuierlichen Bearbeitung einer Produktionslinie mit Werkstücken größerer Oberfläche angewendet wird und für den Einsatz in der Zahntechnik ungeeignet erscheint.

Beim *Strahlspanen* erfolgt laut Fritz et al. [1990] eine

- = *Oberflächenverbesserung durch Spanen mit ungebundenen Körnern, die in einem Luft- oder Flüssigkeitsstrahl mit hoher Geschwindigkeit auf die Werkstückoberfläche auftreffen.*

Dies zeigt große Ähnlichkeiten mit der Definition des *Strahlens* von Hiersig [1995]:

- = *Fertigungsverfahren bei denen feste und / oder flüssige Strahlmittel mit hoher Geschwindigkeit auf das zu bearbeitende Strahlgut aufprallen.*

Während das Strahlspanen laut DIN 8589 dem Fertigungsverfahren des Spanens zugeordnet werden kann, ist das Strahlen laut Hiersig [1995] keinem Fertigungsverfahren nach DIN eindeutig zuzuordnen. Jedoch ordnet Hiersig das Strahlspanen dem Strahlen als eine Untergruppe zu. Dies zeigt die Schwierigkeiten der Begriffsdefinitionen und Einordnung dieser Verfahren in eine Systematik, die auch nicht immer von jedem Autor mit Sicherheit beherrscht wird, wie im Laufe der Literaturstudien zu bemerken war. Im Folgenden soll der Einfachheit halber von dem Begriff des Strahlens als Oberflächenbearbeitung mit geometrisch unbestimmten Schneiden und ungebundenem Korn ausgegangen werden.

Das Strahlen ist auch in der dentalen Technologie seit längerer Zeit bekannt. Die Einsatzgebiete des Strahlens sind dabei vielfältig:

- Entfernen von Einbettmasseresten und feuerfesten Stumpfmassen
- Entfernung von Oxiden nach dem Guss
- Entgratung von Gussobjekten
- Vergrößerung der realen Oberfläche
- Konditionierung von Metalloberflächen vor dem Beschichten (Kunststoff oder Keramik)
- Glanzstrahlen

[Brämer 1995, Eder und Wickens 1996, Lenz 1987, Rüb 1969, Tiller et al. 1985].

Den Hauptanteil dabei trägt das Strahlen mit Korund oder auch Sandstrahlen genannt. Weniger verbreitet dagegen ist das Strahlen mit Glasperlen, welches hauptsächlich auf Goldgusslegierungen zur Steigerung des Glanzes angewendet wird [Brämer 1995].

Beim herkömmlichen Sandstrahlen werden in einem Pressluftstrom beschleunigte Partikel (am häufigsten Korund, eine kristalline Modifikation des  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) auf die zu bearbeitende Oberfläche gerichtet. Die scharfkantigen Partikel treffen mit einer hohen kinetischen Energie auf die Oberfläche, wobei sie Arbeit in Form von plastischer Deformation und dem Abheben von Spänen verrichten. Gleichzeitig können in der oberflächennahen Zone Gefügestörungen auftreten. Ein Teil der Energie wird ebenfalls in Wärme umgewandelt, die nicht nur zum Abheben der Späne führt, sondern auch einen lokalen Schmelzprozess auslöst. Dieser kann wiederum zu lokalen Entmischungsvorgängen, zum Impaktieren von Strahlkörnern und

schlussfolgernd zu einer Verunreinigung der Oberfläche führen [Darvell et al. 1995, Ludwig 1996, Marxkors 1988, Tiller et al. 1985].

Die Gesamtheit der Oberflächenveränderungen nach dem Korundstrahlen bewirkt eine Zunahme der Oberflächenenergie, die zu einer höheren Benetzbarkeit der Oberfläche führt. Diese Eigenschaft begünstigt nachfolgende Beschichtungsvorgänge zum Verblenden metallischer Dentalwerkstoffe mit Kunststoff oder Keramik [Ludwig 1996, Tiller et al. 1985].

Die in der dentalen Technologie verwendeten Körnungen des Korundes sind vorwiegend 110µm und 250µm, seltener 50µm. Je nach Aufgabenstellung werden diese Körnungen individuell eingesetzt. Dabei kommt es zu einer der jeweiligen Körnung entsprechenden Rautiefe. Während beim Einsatz von Strahlmitteln der Körnung 50µm Rautiefen von 2 bis 4 µm erreicht werden können, verdoppeln sich die Werte bei Verwendung von Strahlmittel der Körnung 250µm auf 4 bis 8µm [Tiller et al. 1985].

In Untersuchungen des herkömmlichen Sandstrahlens durch Lenz [1987] sind sogar Rautiefen zwischen 10µm und 20µm festgestellt worden. Um diese stark aufgerauten Oberflächen bis hin zu einer idealen Politur zu bearbeiten ist ein nicht unerheblicher Materialverlust durch Abtragen der Profilerhebungen nötig. Auch werden die tiefsten Stellen durch nachfolgendes Schleifen und Polieren nicht immer vollständig eingeebnet, wobei mikroskopische Defektstellen verbleiben können. Diese Defektstellen können für eine verstärkte Biofilmbildung und Plaqueakkumulation auf einer vermeintlich glänzenden, also "glatten" Oberfläche verantwortlich sein [Lenz 2000].

In einer weiteren Studie wurde die Deformation graziger Gussobjekte beim Sandstrahlen untersucht [Peutzfeld und Assmussen 1996]. Dabei wurde festgestellt, dass die Deformationen der Oberfläche vom angewendeten Strahldruck, der Strahldauer und der Partikelgröße des Strahlmittels abhängig sind. Vor allem durch Verringerung der Partikelgröße können infolge einer geringeren kinetischen Energie des auftreffenden Strahlkornes Deformationen reduziert werden. Daraus schließt letztendlich der Vorteil der Anwendung feinkörniger Partikel.

### *2.3.3. Systematik und Anwendung der Strahlverfahren*

Die vorwiegend in der industriellen Technologie Anwendung findenden Strahlverfahren sind in ihren Variationen sehr zahlreich und lassen sich nicht leicht systematisieren. Da es für die Unterteilung der Strahlverfahren keine Normen gibt (z.B. nach DIN), sind auch die Angaben in der Fachliteratur nur schwer in Einklang zu bringen. Eine chronologische Übersicht über die von den einzelnen Autoren beschriebenen beziehungsweise systematisch differenzierten Strahlverfahren ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tab.1: Systematisierung von Strahlverfahren in der Literatur

<b>Autor</b>	<b>Jahr</b>	<b>Systematiken der Verfahren</b>
Rüb	1969	Art der Aufbringung des Strahlmittels auf die Oberfläche 1. Schleuder-Strahlanlagen (Schleuderrad) 2. Druckluft-Strahlanlagen (Trockenstrahlkabine) 3. Nassstrahlanlagen (Druckstrahl-Läppanlage) 4. Sonderform: Vakuum-Strahlanlage
Horowitz	1979	Einteilung der Strahlverfahren nach Beschleunigung: 1. Zentrifugalkraft (Schleuderrad) 2. Druckluftsysteme - Anlagen nach dem Saugsystem (Injektor-Prinzip) - Anlagen nach dem Gravitationssystem (Injektor-Prinzip) - Anlagen nach dem Druckluft-System Vorzug: Injektor-Gravitationsprinzip
Maass	1981	- Trockenstrahlverfahren - Nassstrahlverfahren: Air-Water-Sand Process
Bormann	1982	- Nassstrahlverfahren - Trockenstrahlverfahren - Druckstrahlen - Venturistralen - Druckluftstrahlen - Schleuderradstrahlen
anonymus	1983	- Schleuderrad - Druckgebläse - Injektorpistole - Druckstrahlkabinen - Trommelanlagen - Hängebahnanlage
Swinkels	1986	- Pressluftanlage - Schleuderrad
Simon, Thoma	1989	1. Anlagentechnik - Schleuderradstrahlen - Druckluftstrahlen 2. Medium - Trockenstrahlen - Nassstrahlen (Schlammstrahlen, Strahl läppen) 3. Technologie - Manuell - Halbautomatisch - Automatisch
Fritz	1990	1. Strahlgemischförderung: - Druckluftverfahren - Pumpenverfahren - Schleuderradverfahren 2. Trägermedium: - Nassstrahlen - Trockenstrahlen
Rusterholz	1991	Systeme der Zuführung und Beschleunigung: 1. Druckluft 2. Zentrifugalbeschleunigung 3. Gravitationsprinzip Injektordüse
Kaiser	1993	Strahlanlagen 1. Schleuderradanlage 2. Druckstrahlanlage - Injektorprinzip (Ansaugung des Strahlmittels durch Unterdruck) - Gravitationsprinzip (Strahlmittelführung durch Schwerkraft) - Druckluft (direkte Strahlmittelschickung durch Druckluft) Hilfseinrichtungen - Trommelstrahlanlage

		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Drehtischstrahlanlage</li> <li>- Hängebahnanlage</li> <li>- Rollganganlage</li> <li>- Durchlaufstrahlanlage</li> </ul>
Hiersig	1995	Einteilung nach Beschleunigung: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Druck (mit Flüssigkeit, Luft oder Gas)</li> <li>2. Schleuderrad</li> </ol>
Chomitsch	1995	- magnet-abrasive Bearbeitung
Dreher	1995	Arten der Trockenbearbeitung: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Trommelbearbeitung</li> <li>- Bearbeitung in Vibratoren</li> <li>- Fliehkraft-Trommelbearbeitung</li> </ul>
König	1996	Einteilung des Strahlspanen: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Druckluftstrahlen</li> <li>- Nassdruckluftstrahlen</li> <li>- Druckflüssigkeitsstrahlen</li> <li>- Dampfdruckstrahlen</li> <li>- Schleuderstrahlen</li> <li>- Lappstrahlen</li> </ul>

Um eine vereinfachte und auf die grundlegenden Unterschiede der verschiedenen Technologien bezugnehmende Übersicht zu erreichen ist folgende Unterteilung sinnvoll:

Tab. 2: Vorschlag zur Einteilung von Strahlverfahren nach technologischen Parametern

Beschleunigung	Trägermedium	Verfahrenstechnologie
1. Druckluft	1. Trockenstrahlen	1. manuell
2. Zentrifugalkraft	- Luft	2. halbautomatisch
3. Magnetfeld	- Gas	3. vollautomatisch
	2. Nassstrahlen	

Mittels dieser Einteilungsweise können alle oben aufgeführten Strahlverfahren durch Kombination der in den drei Spalten genannten Kriterien charakterisiert und systematisch zugeordnet werden. Im folgenden sollen noch einmal kurz die wichtigsten Technologien näher charakterisiert werden.

➤ Druckluft-Trockenstrahlanlagen

Bei den Druckluftanlagen ist man in der Wahl des Strahlmittels frei, es können abrasive, harte oder kugelförmige Mittel eingesetzt werden. Zur Beschleunigung des Strahles muss die elektrische Energie zunächst zur Erzeugung der Druckluft verwendet werden, bevor sie in Beschleunigungsenergie umgewandelt werden kann. Dem Druckluftstrom wird das Strahlmittel beigemischt und tritt durch eine meist bewegliche Düse aus. Der Vorteil dabei ist die Möglichkeit des gerichteten Strahlens durch die Beweglichkeit der Strahldüse. Die Zuführung und Beschleunigung des Strahlmittels erfolgt auf verschiedene Weisen. Beim Saugsystem wird das Strahlmittel nach dem Prinzip der pneumatischen Förderung durch die Bildung eines Unterdruckes in der Injektordüse aus dem Sammelbehälter angesogen. Das Gravitationssystem arbeitet ebenfalls mit einer Injektordüse. Im Unterschied wird das Strahlmittel unter Wirkung der Schwerkraft den Strahldüsen zugeführt. Bei nach dem

Drucksystem arbeitenden Anlagen steht der Vorratsbehälter des Strahlmittels unter Druck. Die eigentliche Beschleunigung des Strahlmittels erfolgt erst in der Strahldüse selbst. Bei allen Druckluftsystemen ist es wichtig, den Strahldruck präzise einstellen zu können, da dieser den Strahlerfolg wesentlich mitbestimmt. Das Prinzip der Druckluft-Trockenstrahlanlagen findet als halbautomatisches Verfahren in der dentalen Technologie in Form des traditionellen Sandstrahlens Anwendung [Horowitz 1979, Kaiser 1993, Rüb 1969].

➤ Druckstrahl-Läppanlagen

Der Unterschied dieser Verfahren zum reinen Druckstrahlen ist allein die Anwendung des Trägermediums: Die Druckstrahl-Läppanlagen arbeiten nach dem Nassstrahlverfahren. Es werden meist abrasive Strahlmittel feinsten Körnung (Siliziumkarbide und Korund; 2-15µm) einem Flüssigkeitsstrahl beigemischt. Das Prinzip besteht darin, dass die abrasiven Partikel nur die höchsten, aus dem auf der Oberfläche befindlichen Flüssigkeitsspiegel herausragenden Profilerhebungen erreichen und bearbeiten. Daher zählt das (Druck)Strahl-Läppen zu den Feinbearbeitungsverfahren. Aufgrund der Verwendung eines flüssigen Trägermediums konnte sich das Druckstrahl-Läppen in der dentalen Technologie nicht durchsetzen [Bernheyer 1960, Dickore 1954, Rüb 1969].

➤ Schleuderrad-Strahlanlagen

Die Beschleunigung des Strahlmediums erfolgt beim Schleuderrad rein mechanisch über Zentrifugalkraft. Das Strahlmittel gelangt in das Zentrum des Schleuderrades. Beim Austreten des Strahls aus dem Rad erfährt dieser eine Auffächerung, wodurch das Ausrichten des Strahls auf eine begrenzte Fläche erschwert wird. Zur Anwendung kommen vorzugsweise kugelförmige Strahlmittel. Allerdings können Glaskugeln bisher noch nicht angewendet werden, da diese durch Überbeanspruchung bereits beim Eintritt in das Schleuderrad brechen. Die direkte Umwandlung von elektrischer Antriebs- in Bewegungsenergie verleiht diesem vollautomatischen Verfahren eine hohe Effektivität, wobei die Anwendung wegen der intensiven Strahlung und großen Strahlstreuung auf große, grobe Werkstücke beschränkt bleibt. Aus den dargestellten Gründen wird ersichtlich, dass das Schleuderradverfahren für die Anwendung in der dentalen Technologie ungeeignet ist [Horowitz 1979, Kaiser 1993, Rüb 1969].

➤ magnet-abrasive Bearbeitung

Durch die Einwirkung eines impuls gesteuerten Magnetfeldes kann nach Chomitsch die Anordnung der Kristalle eines Metalls verändert werden, indem diese einem "zyklischen Aufrütteln" unterliegen. Verstärkt werden kann dieser Effekt durch die Kombination mit einer mechanischen Bearbeitung, in diesem Beispiel einem im Magnetfeld bewegten abrasiven Ferropulver. Das Schleifmittel verhält sich unter dem Einfluss des Magnetfeldes wie eine elastische Bürste, welche die Oberfläche schabend bearbeitet.



Auch die Zahl der Mikrorisse soll durch diese Bearbeitung wesentlich niedriger gehalten werden [Chomitsch 1995].

Entsprechend der technologischen Vielfalt der Strahlverfahren und der Unterschiedlichkeit der eingesetzten Mittel haben Strahlverfahren ein sehr breites und differenziertes Anwendungsgebiet. Rüb [1969] unterscheidet Strahlen als mechanische Oberflächenbehandlung nach den Aufgaben in

1. Reinigungsstrahlen (Putzen, Entzundern, Entrosten)
2. Strahlen zur Veredelung
  - mit Veränderung der Mikrostruktur
  - materialabnehmendes Feinbearbeiten
3. Verfestigungsstrahlen (Oberflächenverformung ohne Materialabnahme).

Auch in der Definition des Strahlens von Hiersig findet sich eine übersichtliche und aktualisierte Einteilung nach:

1. Umformstrahlen
2. Oberflächenveredelungsstrahlen
3. Strahlspanen
4. Reinigungsstrahlen
5. Verfestigungsstrahlen.

Die in der dentalen Technologie traditionell vorherrschenden Strahlaufgaben sind – wie bereits oben aufgeführt - auf die Reinigung und Konditionierung metallischer Dentalmaterialien gerichtet. Aufgaben der Feinbearbeitung oder Oberflächenveredelung werden bisher kaum beachtet.

#### 2.3.4. *Strahlmittel*

Auch für die Vielzahl der auf dem Markt befindlichen Strahlmittel gibt es keine einheitlich gültige Normierung [Benninghoff 1983]. Im wesentlichen kann unterschieden werden in metallische, mineralische und organische Strahlmittel (Abb. 2). Je nach Eigenschaft der verwendeten Materialien sind diese Strahlmittel entweder hart oder weich, entweder kantig oder kugelförmig und zeigen durch ihre spezifischen Charakteristika ihr Anwendungsgebiet auf. Die metallischen Strahlmittel können wiederum in Eisen- und Nichteisen-Strahlmittel unterteilt werden. Sie sind vorwiegend kantig, von großer Härte und werden vorzugsweise zum Reinigen, Mattieren, Entzundern und Aufrauen verwendet. Jedoch gibt es auch bei den metallischen Strahlmitteln sogenannten Hartgusschrot, welcher Kugelform besitzt und daher zum Verfestigen eingesetzt wird.

Die mineralischen Strahlmittel können entsprechend ihrer Gewinnung in natürliche und künstliche Mittel unterschieden werden. Zu ersteren gehört der Quarz, zur zweiten Gruppe Korund und Glas. Auch mineralische Strahlmittel zeigen eine große Härte und sind in

kantiger sowie runder Form erhältlich. Verwendung finden sie ebenfalls zum Reinigen, Vorbehandeln, Entzundern, Verdichten und Glätten.

Auch die organischen Strahlmittel können in natürliche und künstlich hergestellte Mittel unterteilt werden. Natürliche Strahlmittel sind zum Beispiel Nussschalen, Obstkerne, Reishülsen, Maiskörner und Holzspäne. Künstlich hergestellte organische Strahlmittel sind Kunststoffe. Sie haben meistens weichen, schabenden Charakter und werden vorzugsweise in Trockenstrahlanlagen zum Entfernen von Krusten, zum Entrußen und Entgraten von Kunststoffen verwendet. Bei der Bearbeitung von Metallen finden sie jedoch kaum Anwendung [Benninghoff 1983, Kaiser 1993, Maass 1981, Ott 1979, Rüb 1969, Swinkels 1986, Zieler 1963].

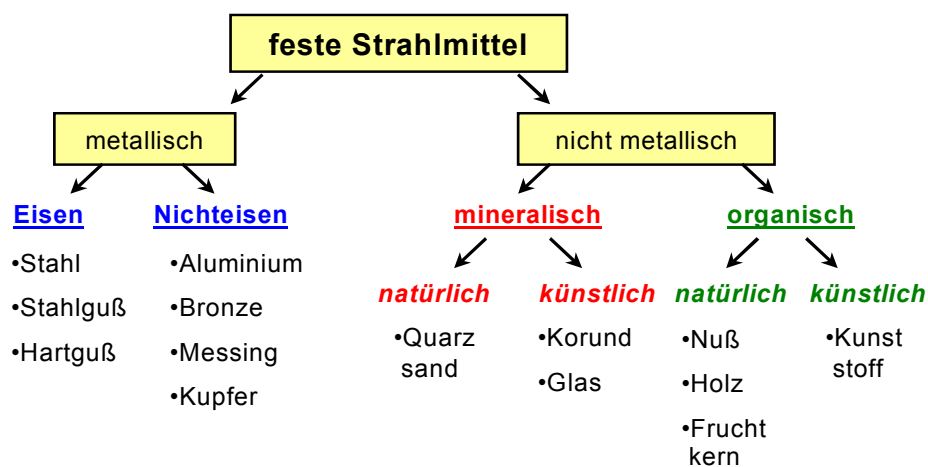


Abb. 2: Schematische Übersicht der festen Strahlmittel

Bei der Auswahl eines für einen Arbeitsgang geeigneten Strahlmittels steht an erster Stelle die Frage nach der zu vollbringenden Leistung, da das verwendete Mittel den erzielbaren Effekt zum großen Teil mitbestimmt. Soll Material abgetragen oder geschont werden, soll eine Veredlung oder eine Aufrauung erfolgen. Zudem muss der Verschleiß (break-down-rate) beziehungsweise die Abnutzung mit beachtet werden. Weitere zu beachtende Kriterien für den Strahlerfolg sind die Korngröße, die Korngrößenverteilung, Kornform und nicht zuletzt die Strahlparameter [Benninghoff 1983, Horowitz 1979, Rüb 1969, Zieler und Lepand 1964].

### 2.3.5. Kugelstrahlen (shot peening) und alternative Verfahren

Wie bereits ausgeführt wurde, findet das Trockenstrahlen mit scharfkantigem, abrasiven Korn in der dentalen Technologie in Form des Korundstrahlens bereits Anwendung. Sucht man nach Alternativen der nicht abrasiven, nicht manuellen Bearbeitung in der Zahntechnik, so sind Möglichkeiten in der Wahl eines anderen Strahlmittels gegeben. Da die Verwendung organischer Strahlmittel auf die Metalloberfläche mangels ausreichenden Strahlerfolges auszuschließen ist, bleibt der Einsatz kugelförmiger metallischer oder mineralischer Strahlmedien. In Untersuchungen von Starker [1986] an kugelgestrahlten

Osteosyntheseplatten wurde festgestellt, dass sich die Anwendung von metallischen Kugeln negativ auf die Oberflächenqualität auswirkt (Rauigkeit und Korrosionsverhalten). Es wurde eindeutig den mineralischen Strahlkugeln der Vorrang gegeben.

Das Kugelstrahlen oder auch shot-peening (engl.: shot = Schuss, Kugel; peening = mit der Finne des Hammers bearbeiten) ist ein Verfahren der spanlosen, also nicht abtragenden Oberflächenbearbeitung und zählt zu den Feinbearbeitungsverfahren. Hiersig definiert die Feinbearbeitungsverfahren als alle diejenigen, die eine Werkzeugoberfläche hoher Qualität erzeugen, welches sich in Form einer geringen Rauheit und eines gezielten Härte- und Eigenspannungszustandes der Randzone ausdrückt. Betrachtet man die in der Literatur angegebenen Einsatzgebiete und Zielstellungen des shot-peening, so ist festzustellen, dass in jedem Fall eine Erhöhung der Dauerfestigkeit, Lebensdauer und vereinzelt der oberflächenverfestigende Effekt angegeben werden [Gray 1988, Ott 1979, Scholtes 1993, Starker 1989]. Dabei stellt sich die Frage, wie diese Effekte bei einem spanlosen Verfahren erzielt werden können.

Jede durch Druckluft beschleunigte Strahlkugel trifft mit einer der Beschleunigung entsprechenden kinetischen Energie auf die Werkstückoberfläche auf. Dort verrichtet sie Arbeit im Sinne einer Umwandlung der Bewegungsenergie in Arbeit zur plastischen Verformung und Wärme. Die Wärmeentstehung ist im wesentlichen zur Verrichtung der plastischen Verformungsarbeit nötig. Jeder Kugeleinschlag zeigt dabei die Wirkung eines kleinen Hammers und erzielt

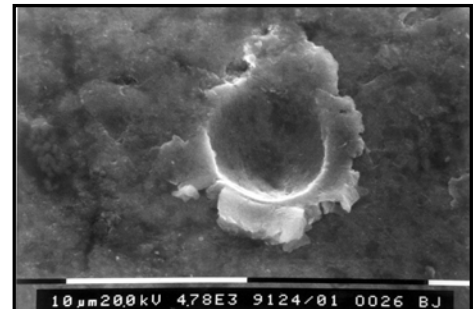


Abb.3: REM Aufnahme eines Kugeleinschlages (SM2) auf die Titanoberfläche

einen kalottenförmigen Einschlag von wenigen hundertstel Millimeter Tiefe (REM-Aufnahme in Abb. 3). Trotz der entstehenden Wärme zählt das Kugelstrahlen zu den kaltverformenden Verfahren. Die tiefer liegende, kalt gebliebene Schicht hat das Bestreben, den plastisch verformten Bereich am Ort zu halten. Infolge treten an der Oberfläche Druckspannungen und im Inneren Zugspannungen auf. Da die Druckspannungen wesentlich größer sind als die Zugspannungen, ist die größere Widerstandskraft der Oberfläche in Form einer erhöhten Dauerfestigkeit erklärt [Bormann 1982, Dickore 1954, Fischbeck und Schmitt 1945, Heubel 1984, Kaiser 1993, Lenz 1987, Ott 1979, Scholtes 1993, Schröder 1947, Zieler 1964].

Aber nicht nur eine erhöhte Dauerfestigkeit und Verbesserung der Lebensdauer sind die Folge der Kugelstrahlbehandlung. Durch den hämmernden Effekt der Strahlkugeln wird die Metalloberfläche verdichtet und aufgehärtet, des weiteren können kleine Fehlstellen in Form von Mikrorissen und Poren zugeschmiedet werden. Ein weiterer positiver Effekt ist der verbesserte Widerstand gegen korrosive Vorgänge, insbesondere gegen Spannungsrisskorrosion [Aparicio 1998, Friske et al. 1981, Lenz 1987, Ott 1979, Scholtes 1993, Schröder 1947, Speidel 1981, Starker 1986, Zieler und Lepand 1964].

Wesentliche Voraussetzung für den Erfolg des Kugelstrahlens und das Erreichen des gesetzten Zieles ist die Einhaltung verschiedener *Strahlparameter*. Es ist darauf zu achten, dass das Strahlmittel nicht senkrecht, sondern vorzugsweise in einem Winkel von ca. 45° auf die Oberfläche trifft. Des weiteren bestimmt vor allem der Strahldruck das Strahlergebnis. Bei weichen Legierungen sollte der Druck vermindert werden, da die Möglichkeit einer Aufrauung und Verunreinigung der Oberfläche durch steckengebliebene Strahlkugeln gegeben ist. Ebenfalls kann es bei zu hohem Druck (unabhängig vom bearbeiteten Metall) zu Störungen der mikrokristallinen Struktur in Form von sogenannten Versetzungen beziehungsweise Verformungszwillingen kommen.

Auch die Strahldauer sollte einen bestimmten Wert nicht überschreiten. Wird ein Werkstück zu lange gestrahlt und ist der Sättigungspunkt der erzielbaren Oberflächenspannung überschritten, kommt es zu einer Abnahme der Festigkeitswerte. Unabhängig von Strahlmittel und Strahlparametern kann bei harten Metallen mit einer Ausgangshärte über 500 HV(30) kein die Oberfläche aufhärtender Effekt mehr nachgewiesen werden [Bernheyer 1960, Dickore 1955, Fauß 1951, Heubel 1984, Lenz 1987].

Wird eine bereits vorbearbeitete und geglättete Oberfläche mit Kugeln bestrahlt, so ist mit einer Zunahme der Rauigkeit zu rechnen, auch wenn die Strahlparameter ideal eingestellt sind [Dickore 1954, Ott 1979, Rusterholz 1991, Scholtes 1993, Schröder 1947].

Durch die richtige Auswahl von Strahlmittel und Strahlparametern kann somit die Oberfläche eines metallischen Werkstoffes gezielt verändert werden. Jedoch sollte bei der verwendeten Strahlanlage darauf geachtet werden, dass es zu keinen Verschmutzungen des Strahlmittels kommt, da durch vereinzelte scharfkantige Partikel der Strahlerfolg herabgesetzt werden kann. Dies trifft ebenfalls auf die sogenannte "break down rate" zu. Diese bezeichnet den prozentualen Anteil der bei einem Strahlvorgang zu Bruch gegangenen Kugeln. Diese müssen vor einer eventuellen Wiederverwertung aussortiert werden. Das geschieht gleichzeitig mit einer Reinigung und Aufbereitung des Strahlmittels in industriellen Großanlagen mittels "Hochleistungs-Separatoren" [Horowitz 1979, Scholtes 1993].

Das Kugelstrahlverfahren erzielt bei optimalem Einsatz eine Vielzahl von positiven Eigenschaften der Oberfläche, die gezielt beeinflusst werden können und im Gesamtbild einer Oberflächenvergütung und Oberflächenveredelung entsprechen. Dieses Verfahren scheint eine erfolgversprechende Alternative auch für die dentale Technologie zu sein.

In der industriellen Reinigungstechnik sind Bearbeitungsverfahren mit alternativen Wirkprinzipien bekannt. Zu diesen gehören beispielsweise Verfahren, bei denen die kinetische Energie über (teils rotierende) Magnetfelder bereitgestellt wird. Während des Literaturstudiums konnten außer über das oben genannte magnet-abrasive Pulververfahren keine weiteren Angaben gefunden werden.

## 2.4. Spezielle Verfahren der Oberflächenbearbeitung

### 2.4.1. Mikrostrahlverfahren

In der industriellen Technologie steht der Begriff des "Finishing" allgemein für die technische Methode, den Endzustand einer Oberfläche auf wirtschaftliche Art mit optimalem Ergebnis (für den Endverkauf) zu erzielen. Dabei entspricht dem "funktionellen Finish" das Erzielen einer den funktionellen Ansprüchen gerecht werdenden, geglätteten und optimierten Oberfläche, wie sie beispielsweise in der Elektrotechnik, Luft- und Raumfahrttechnik sowie Medizin- und Dentaltechnik gefordert wird. Dabei kann nur die nicht individuelle Arbeitsweise eines mechanischen Systems das gleiche Finish jedes einzelnen Werkstücks gewährleisten [Dreher 1995].

Für die nicht manuelle Bearbeitung in der dentalen Technologie bedeutet dies die Anwendung eines Systems, bei welchem durch geringen Arbeitsaufwand in kurzer Zeit eine optimierte Oberfläche erreicht werden kann, die bestenfalls einer nur geringen Weiterbearbeitung bedarf.

Die Anwendung von Trockenstrahlverfahren in der dentalen Technologie in Form des herkömmlichen Korundstrahlens ist seit langem bekannt und weit verbreitet (siehe Kap. 2.3.2.). Das Verfahren wird vorzugsweise zum Reinigen und Konditionieren unter Verwendung von Körnungen der Größenordnung 110-250µm, seltener 50µm angewandt. Auch das Kugelstrahlen als nicht abrasive Variante des Trockenstrahlens ist nicht unbekannt, wird bisher vornehmlich zur Glanzbearbeitung von Goldlegierungen angewendet [Brämer 1995]. Die durchschnittliche Partikelgröße liegt bei etwa 100-200µm.

Wie in Untersuchungen festgestellt werden konnte, wächst mit zunehmender Partikelgröße die Möglichkeit von Deformationen und stärkeren Aufrauungen der Oberfläche [Peutzfeld und Assmussen 1996]. Es steht somit die Forderung nach Strahlmedien für die Trockenstrahlbearbeitung, die im Mikrobereich liegen und daher mit einer geringeren kinetischen Energie auf die Oberfläche auftreffen und kleinflächige Verformungen hervorrufen. Diese Forderungen wurden in einem seit kurzem auf dem Markt befindlichen Strahlgerät und zugehörigen abrasiven und nicht abrasiven feinkörnigen Strahlmittelgemischen erfüllt. Dieses Bearbeitungssystem wurde unter der Bezeichnung "Micro-Finishing" in die dentale Technologie eingeführt [Gruber 2000]. Um Effizienz und Anwendbarkeit dieses Mikrostrahlverfahrens wissenschaftlich einschätzen zu können, wurde dieses System den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen zugrunde gelegt.

### 2.4.2. Magnet-abrasive Nassverfahren

Bei der Suche nach alternativen, nicht manuellen Oberflächenbearbeitungsverfahren für die Zahntechnik wurde eine Technologie gefunden, die in ihrer Funktionsweise als magnet-abrasives Nassverfahren bezeichnet werden kann. Diese Technologie wird vom Hersteller als Reinigungs- und Glanzverfahren empfohlen, wobei der mechanische Bearbeitungseffekt

durch dünne Stahlstifte erzeugt wird, die durch ein rotierendes Magnetfeld über die nicht magnetischen Werkstücke bewegt werden. Die Bearbeitung erfolgt in Flüssigkeit, wobei je nach der gewünschten Wirkung zwischen aggressiven Ätzbädern oder neutralen Reinigungsbädern gewählt werden kann. Unter den Bezeichnungen "Ecoclean" und "Microclean" wird diese neuartige Technologie für zahnärztliche Praxen und Dentallaboratorien angeboten. Dieses Verfahren ist der herkömmlichen Systematik der Fertigungsverfahren schwer zuzuordnen und soll aufgrund fehlender Literaturgrundlagen separat betrachtet werden.

### 3. ZIELSTELLUNG

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die experimentelle Bewertung des Mikrostrahlverfahrens (Micro-Finishing) und des magnet-abrasiven Reinigungsverfahrens (Ecoclean) zur Oberflächenbehandlung gegossener metallischer Dentalwerkstoffe.

Dabei soll die Wirkung dieser Verfahren auf die gegenwärtig in der Praxis vorherrschenden und aus der Sicht der biologischen Verträglichkeit an Bedeutung gewinnenden Gruppen metallischer Werkstoffe untersucht werden:

- aufbrennfähige hochgoldhaltige Legierungen
- Kobaltbasis-Legierungen
- cp Titan.

Aus jeder dieser Gruppen ist ein charakteristisches Produkt in die Untersuchungsreihen aufzunehmen.

Um den Bearbeitungseffekt der zu prüfenden Verfahren im Rahmen der laboratoriumsüblichen Phasen der Oberflächenbearbeitung zu bewerten, sind Gussproben der drei genannten metallischen Werkstoffe mit folgenden Ausgangszuständen zu untersuchen:

- gegossen, ausgebettet und im Ultraschallbad gereinigt
- gegossen, ausgebettet und laboratoriumsüblich korundgestrahlt (Ecoclean)
- beschliffen mit unterschiedlicher Körnung.

Diese Oberflächenzustände sind

- im Mikrostrahlverfahren mit abrasivem und nicht abrasivem (Kugel-) Strahlmittel einzeln und in Kombination
- im magnet-abrasivem (Ecoclean-) Verfahren mit dem Beizbad und dem tensidischen Reinigungsbad einzeln und in Kombination

zu behandeln.

Die Oberflächen in den Ausgangszuständen und in den einzelnen Bearbeitungszuständen sind mit folgenden metrischen und bildgebenden Verfahren auszuwerten:

1. profilographische Untersuchungen
2. Bestimmung des Reflexionsvermögens
3. Auflichtmikroskopie
4. Rasterelektronenmikroskopie.

Weiterhin ist die Struktur oberflächennaher Schichten durch metallographische Untersuchungen an Probenquerschliffen auszuwerten.

Mikrohärteprüfungen an Querschliffen und ausgewählten Oberflächen sollen ergänzend die Frage einer möglichen Kaltverfestigung durch die Bearbeitung klären.

Die metrisch erfassten Größen sind mit adäquaten statistischen Methoden auszuwerten.

## 4. MATERIALIEN UND METHODEN

### 4.1. Untersuchte Materialien

#### 4.1.1. Vorstellung der Materialien

Die Wirkung der zu untersuchenden Bearbeitungsverfahren sollte auf die gängigen, in der Zahnmedizin verwendeten Legierungsgruppen untersucht werden. Diese sind hochgoldhaltige Legierungen, die vorwiegend für die Kronen- und Brückentechnologie eingesetzt werden, Kobaltbasislegierungen für die Modellguss- und Kombinationsprothetik und Titan, welches in allen Bereichen Anwendung findet. Stellvertretend für jede Gruppe wurden folgende Materialien ausgewählt:

1. *Degudent H* der Firma Degussa als Vertreter der hochgoldhaltigen aufbrennfähigen Legierungen. Es weist eine Zusammensetzung von

Legierungselement	Au	Pt	Pd	In	Ta
Masseprozent	84,4	8,0	5,0	2,5	0,1

auf.

2. Aus der Gruppe der Kobaltbasislegierungen wurde *Remanium GM 380* der Firma Dentauro verwendet. Nach Herstellerangaben setzt sich diese Legierung aus Anteilen folgender Elemente zusammen:

Legierungselement	Co	Cr	Mo	C	Si	Mn
Masseprozent	64,6	29,0	4,5	0,6	0,6	0,5

3. Des weiteren wurde unlegiertes Titan mit einem Reinheitsgrad von 99,76% verwendet. Nach DIN 17850 wird dieses als Titan Grad 1 bezeichnet. Es handelt sich hierbei um *Biotan* der Firma Schütz Dental mit folgender Zusammensetzung:

Legierungselement	Ti	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	C	H
Masseprozent	99,76	0,12	0,05	0,06	0,013

#### 4.1.2. Herstellung der Prüfkörper

Zur Herstellung identischer Prüfkörper wurde 0,5 mm starkes glattes Plattengusswachs in doppelter Lage in 10 mm breite und 20 mm lange Streifen geschnitten. Nach Anstiftung wurden diese in die nach Herstellerangaben geforderten Einbettmassen eingebettet und entsprechend der Vorlagen gegossen.

Diese waren für die hochgoldhaltige Legierung Degudent H die Heravest-Einbettmasse. Der Guss erfolgte anschließend im Combi-Labor CL-IG der Firma Heraeus.



Die Prüfkörper für Remanium GM 380 wurden in Wirovest eingebettet und mit dem Castomat-Gussgerät der Firma Krupp gegossen.

Die in Biotan zu gießenden Prüfkörper wurden in der Biotan - K&B Einbettmasse eingebettet. Danach erfolgte der Guss im Vakuum-Druckgussverfahren in der Biotan-Gießanlage der Firma Schütz-Dental.

Nach dem Guss wurden die Gusskanäle mittels einer Trennscheibe abgetrennt.

#### 4.1.3. Vorbereitung der Prüfkörper

Um die Effektivität der Verfahren anhand praxisnaher Bedingungen optimal beurteilen zu können, wurden den Prüfkörpern unterschiedliche Oberflächenzustände (Ausgangszustände) zu Grunde gelegt. Diese waren

1. der ausgebettete *Gusszustand*, welcher im Ultraschallbad 5 Minuten ohne Spülmittelzusatz gereinigt wurde,
2. das Strahlen mit herkömmlichem *Korund der Körnung 110 µm* während einer Zeit von 1 Minute bei einem Druck von 2-3 bar,
3. der *Nassschliff* mit Siliziumcarbidpapier der Körnungen 220, 600 und 1200 mit dem Nassschleifgerät DAP-V der Firma Struers (Willich).

Nach der Vorbehandlung erfolgte wiederum die Reinigung im Ultraschallbad.

## 4.2. Geräte und Methodik

### 4.2.1. Micro-Finishing

#### 4.2.1.1. Gerätebeschreibung

Das Peenmatic 600S – Nano-Dental der Firma IEPCO-Oberflächentechnik (Schweiz) ist ein Mikrostrahlgerät mit der Möglichkeit, Feinstrahlmittel über eine Hauptstrahldüse und zwei Griffelstrahler anzuwenden. Die Strahlmittel können mit einem regulierbaren Druck zwischen 0-10 bar verwendet werden. Die vom Vertreiber (Firmen G. Gruber, Linz und J. Stübinger, Trattenbach, Österreich) empfohlenen Werte liegen dabei legierungsspezifisch bei 3-5 bar. Das Strahlgerät arbeitet mit einem Strahlmittelumlauf, wobei verunreinigtes Strahlmittel vor der Wiederverwendung herausgefiltert wird und somit nur sauberes Material zur Anwendung kommt.



Abb.4: Peenmatic 600S

#### 4.2.1.2. Strahlmedien

Für die Bearbeitung von Metalloberflächen werden vom Hersteller unterschiedliche Strahlmittel angeboten. Diese sind das Strahlmedium 1 und das Strahlmedium 2, welche im folgenden näher charakterisiert werden:

➤ Strahlmedium 1 (Abb. 5):

Hierbei handelt es sich um ein Gemenge scharfkantiger, schneidend wirkender kristalliner Bestandteile. Um die Düsendringbarkeit zu erhöhen, werden diesem Anteil sphärischer Partikel zugesetzt. Durch messoptische Analysen konnten Korngrößen zwischen 30 und 80  $\mu\text{m}$  festgestellt werden. Mittels EDX-Analyse wurden die Elemente Aluminium und Silizium nachgewiesen. Vermutlich enthält das Strahlmittel Elektrokorund und Karborundum. Durch die abrasive Komponente des Strahlmediums 1 (folgend auch als SM 1 bezeichnet) können Oberflächenstrukturen abgetragen werden und es dient somit zur primären Bearbeitung gegossener Objekte.

➤ Strahlmedium 2 (Abb. 6):

Das Strahlmedium 2 (folgend auch als SM 2 bezeichnet) besteht aus Strahlkugeln, deren Durchmesser aufgrund optischer Messungen mit 40 bis 65  $\mu\text{m}$  angegeben werden kann. Über mikroanalytische Untersuchungen waren die Elemente Zirkonium (83%), Silizium und Aluminium nachweisbar. Diese Zusammensetzung weist auf Zirkonerde als Hauptanteil des Strahlmittels hin. Da diese Verbindung eine relativ hohe Härte und Dichte aufweist, kann bei entsprechender Beschleunigung eine hohe kinetische Energie auf die zu bearbeitende Oberfläche gebracht werden. Das Strahlmittel 2 dient im zweiten Schritt zur Verfeinerung der Oberfläche.

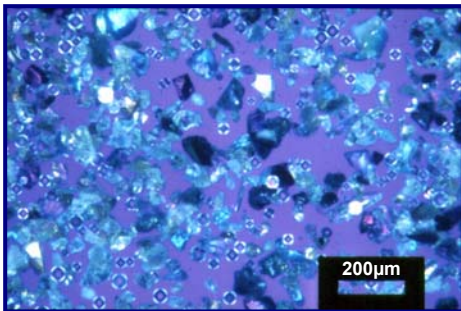


Abb. 5: Strahlmittel 1, Mikraufnahme

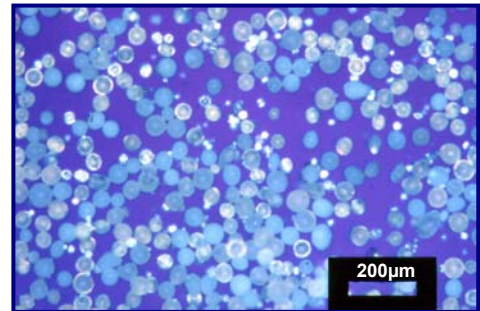


Abb. 6: Strahlmittel 2, Mikraufnahme

#### 4.2.1.3 Methodik

In vorliegenden Untersuchungen sollte experimentell geklärt werden, ob durch Mikrostrahlen auch nach laborüblichem Ausarbeiten und nach Vorpolitur eine Verbesserung des Oberflächenzustandes erreicht werden kann. Daher lagen Probekörper sowohl im gegossenen Zustand, als auch nach Bearbeitung mit Nassschleifpapier der Körnungen 220, 600 und 1200 vor. Die Bearbeitung mit Schleifpapier der Körnung 220 entspricht in etwa dem laborüblichen "Ausarbeiten" und wurde, ebenso wie der Gusszustand, mit den Strahlmedien einzeln und in Kombination bearbeitet. Der 600er und 1200er Nassschliff entspricht einem Feinschliff beziehungsweise einer Vorpolitur. Das scharfkantige Strahlmedium 1 kam in diesen Fällen nicht zur Anwendung.

Der mit herkömmlichem Korund gestrahlte Zustand wurde in die Untersuchungen nicht einbezogen, da die abrasive Komponente des SM 1 als Ersatz des laborüblichen Strahlkorundes (110µm) getestet werden sollte.

Die vorbereiteten Proben wurden wie in Tabelle 3 aufgeführt, im Mikrostrahlgerät Peenmatic 600 S unter folgenden Strahlbedingungen bearbeitet:

1. Bearbeitung mit SM 1:

Strahldruck 3 bis 4 bar, Strahlwinkel 45° bis 60°, Düsenabstand 30 bis 40 mm, Strahldauer je Seite 20 s,

2. Bearbeitung mit SM 2:

Strahldruck 3 bis 5 bar, Strahlwinkel 60° bis 90°, Düsenabstand 30 bis 40 mm, Strahldauer 20 s je Probenseite,

3. Kombination von SM 1 und SM 2 gemäß Punkt 1 und 2.

Nach jedem Arbeitsschritt wurden zwei Proben für nachfolgende Untersuchungen zurückbehalten.

Tab. 3: Ablaufplan der Probenbearbeitung bei der Untersuchung mit dem Micro-Finishing – Verfahren

Material		SM 1		SM 2		SM 1+2	
		Druck	Zeit	Druck	Zeit	Druck	Zeit
<b>Degudent H</b>	gereinigt	3bar	20s	3,5bar	30s	3bar/3bar	20s/20s
	SiC220	2bar	20s	2bar	30s	2bar/2bar	20s/20s
	SiC600			1,5bar	20s		
	SiC1200			2bar	20s		
<b>Remanium GM380</b>	gereinigt	4bar	20s	4bar	30s	4bar/4bar	20s/20s
	SiC220	3,5bar	20s	4bar	30s	3,5bar/3,5bar	15s/15s
	SiC600			2,5bar	20s		
	SiC1200			2bar	15s		
<b>Titan</b>	gereinigt	4bar	20s	5bar	30s	5bar/5bar	20s/20s
	SiC220	3bar	20s	3bar	20s	3bar/3bar	20s/20s
	SiC600			3bar	20s		
	SiC1200			3bar	20s		

#### 4.2.2. Ecoclean

##### 4.2.2.1 Gerätebeschreibung

Bei dem Ecoclean handelt es sich um ein Gerät, welches vom Hersteller als "Glanzgerät" angeboten wird. (Abb. 7) Es besteht aus einem Gehäuse, in welchem sich ein rotierender Magnet befindet. Dieser bewegt sich mit 1420 Umdrehungen pro Minute. Ebenfalls liefert der Hersteller runde Kunststoffbehälter (Objektboxen) mit, in die Stahlnadeln, verschiedene Glanzbäder und das zu



Abb. 7: Ecoclean-Gerät

bearbeitende Objekt eingebracht werden. Das rotierende Magnetfeld bewegt die Stahlnadeln, die dadurch hämmernd auf die Objektoberfläche einwirken. Dadurch soll die Oberfläche des Objektes verdichtet und gereinigt werden, bis ein Glanz entsteht [Schütz-Dental GmbH 1997].

##### 4.2.2.2. Stahlnadeln und Glanzbäder

Die vom Hersteller angebotenen Ecoinox-Nadeln sind Metallzylinder mit einem mittleren Durchmesser von 0,5 mm und einer durchschnittlichen Länge von 5 mm. Die Zusammensetzung konnte über die EDX-Analyse wie folgt nachgewiesen werden:

Fe	= 72,30%
Cr	= 19,11%
Ni	= 8,58%.



Abb. 8: Glanznadeln in der Objektbox  
(kleines Bild: Makroaufnahme)

Es handelt sich somit um einen 19/8-CrNi-Stahl.

Die Ecoinox-Glanznadeln wurden im Anlieferungszustand lichtmikroskopisch betrachtet. (Abb. 8). Die Enden der Nadeln zeigten sich relativ scharfkantig und bieten somit die Möglichkeit, bei der verfahrensbedingten mechanischen Einwirkung auf weichere Oberflächen Verletzungen dieser hervorzurufen. Ebenfalls besteht die Möglichkeit der Einlagerung metallischer Bestandteile in die Oberfläche eines zu bearbeitenden Objektes geringerer Härte.

Bei dem Ecoclean-Verfahren werden die Glanzbadzusätze Ecodec (I) und Glanzkonzentrat (II) angeboten. Das Glanzkonzentrat (II) ist ein Reinigungszusatz für Edelmetalle und Kunststoffe. Das Ecodec (I) ist ein aggressives Beizmittel, welches als erstes Glanzbad für CoCr-Legierungen und Titan verwendet werden soll.

Die chemische Charakterisierung der Glanzbäder ist der Tabelle 4 zu entnehmen.

Tab. 4: Chemische Zusammensetzung der bei dem Ecoclean-Verfahren angewandter Bäder  
(nach Firmenangaben; Betriebsanleitung)

Ecodec (Glanzbad I )	Ecoclean Fluid Grün (Glanzbad II )	Inhalt in %
Phosphorsäure	Salzsäure	5 – 10
Natriumfluorid	Ethoxylierter Aminoalkohol	1 – 5
Amidoschwefelsäure	nichtionische Tenside	< 1,0
	kationische Tenside	< 1,0
	Parfüm	< 1,0
	Farbstoff	< 0,1
	Wasser	Rest
pH = 3,5	pH = 4,0	

Die Zubereitung der Glanzbäder erfolgt legierungsspezifisch in folgender Weise

- Für Edelmetalle und Kunststoffe:
  - 200 g Ecoinox-Nadeln mit 100 cm<sup>3</sup> Wasser und zwei Deckelfüllungen Glanzkonzentrat (II) in die Objektbox füllen.
  - Objektbox mit Deckel verschließen und mit dem Ecoclean für 60 Sekunden rühren.
- Für CoCr-Legierungen:
 

*Flüssigkeit für Glanzbad I:*

  - 200 g Ecoinox-Nadeln mit 120 cm<sup>3</sup> Wasser und 8 g Ecodec-Pulver in die Objektbox füllen
  - Objektbox verschließen und für 60 Sekunden mit dem Ecoclean rühren.

*Flüssigkeit für Glanzbad II:*

  - 200 g Ecoinox-Nadeln mit 120 cm<sup>3</sup> Wasser und zwei Deckelfüllungen Glanzkonzentrat in die Objektbox füllen.
  - Objektbox mit Deckel verschließen und mit dem Ecoclean für 60 Sekunden rühren.
- Für Titan:
 

*Flüssigkeit für Glanzbad I:*

  - 200 g Ecoinox-Nadeln mit 120 cm<sup>3</sup> Wasser und 6 g Ecodec-Pulver in die Objektbox füllen
  - Objektbox verschließen und für 60 Sekunden mit dem Ecoclean rühren.

*Flüssigkeit für Glanzbad II:*

  - 200 g Ecoinox-Nadeln mit 150 cm<sup>3</sup> Wasser und zwei Deckelfüllungen Glanzkonzentrat in die Objektbox füllen [Schütz-Dental GmbH 1997].

#### 4.2.2.3. Methodik

Aufgesinterte Einbettmassereste und grobe Oberflächenstörungen der Gussobjekte, die sogenannte Gushaut, müssen vor der Anwendung abgetragen werden. Daher wurden Prüfkörper mit korundgestrahlter Oberfläche (110µm) und den Nassschliffen der Körnungen 220, 600 und 1200 und nicht der gegossene und gereinigte Zustand für die Untersuchungen herangezogen. Das vorbereitende Schleifen auf Nassschleifpapier soll unterschiedliche, im zahntechnischen Labor übliche Bearbeitungsschritte nachvollziehen. Dabei entspricht der Schliff auf Nassschleifpapier der Körnung 220 etwa dem laborüblichen "Ausarbeiten", während der Schliff mit 1200er Körnung einer Vorpolitur gleicht.

Die vorbereiteten Proben wurden in einzelnen Schritten mit den vorgeschriebenen Bädern bearbeitet, wobei nach jedem Bearbeitungsschritt zwei Rücklagen für anschließende Untersuchungen zurückbehalten wurden. Die Prüfkörper im korundgestrahlten Zustand und dem 220er Nassschliff wurden nach Anwendung des aggressiveren Bad 1 und von Bad 2 einzeln und in Kombination untersucht. Die Prüfkörper mit den Feinschliffen 600er und 1200er Körnung wurden dagegen nur mit dem tensidischen Bad 2 bearbeitet.

Der Versuchsablauf für die einzelnen Prüfkörper ist in Tabelle 5 dargestellt.

Tab. 5: Ablaufplan Ecoclean

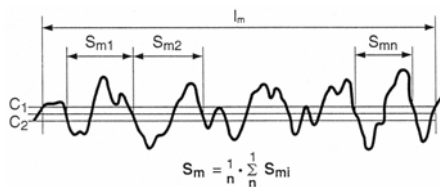
Material	Oberflächenzustand	Bad	Zeit in Minuten
Degudent H	Korund 110µm	II	20
	Korund 110µm		
	SiC 220	II	20
	SiC 220		
	SiC 600	II	20
	SiC 600		
Remanium GM 380	SiC1200	II	20
	SiC1200		
	Korund 110µm	I	30
	Korund 110µm	II	40
	Korund 110µm		
	SiC220	I	30
	SiC220	II	40
	SiC220		
Titan	SiC600	II	40
	SiC600		
	SiC1200	II	40
	SiC1200		
	Korund 110µm	I	30
	Korund 110µm	II	30
	Korund 110µm		
	SiC220	I	30
	SiC220	II	30
	SiC220		
	SiC600	II	30
	SiC600		
	SiC1200	II	30
	SiC1200		

### 4.3. Theoretische Grundlagen der Untersuchungsmethoden

#### 4.3.1. Bestimmung der Oberflächengeometrie

Jede Oberfläche besteht aus einer Überlagerung verschiedener Gestaltabweichungen, die nach DIN 4760 in sechs Ordnungen unterteilt werden. Im wesentlichen bestimmen die Welligkeit und Rauheit die Charakteristik einer Oberfläche. Als Welligkeiten werden Abweichungen von der geometrisch idealen Oberfläche bezeichnet, deren Länge ein Vielfaches ihrer Tiefe beträgt, während bei der Rauheit die Länge der Abweichungen nur ein geringes Vielfache ihrer Tiefe darstellt. Da die Grenze zwischen beiden fließend verläuft, bedarf es einer willkürlich gewählten Grenzwellenlänge, die den Unterschied zwischen Welligkeit und Rauigkeit markiert.

Zur Charakterisierung der Welligkeit kann der **mittlere Spitzenabstand ( $s_m$ )** gemessen werden. Er gibt an, in welchem mittleren Abstand sich alle innerhalb der Messstrecke ermittelten Profilsitzen befinden. Der mittlere Spitzenabstand wird nach EN ISO 4287 wie folgt ermittelt:



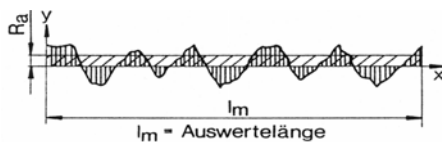
$$s_m = \frac{l_m}{D}$$

$l_m$  = Bezugsstrecke

$D$  = Gesamtzahl der entlang der Bezugsstrecke ermittelten Riefen

Zur näheren Beurteilung der Rauigkeit sollen nach DIN 4768 folgende Werte dienen:

Der **Mittenrauwert ( $R_a$ )** bezeichnet das arithmetische Mittel aller Profilerhebungen von der mittleren Linie innerhalb der Messstrecke nach Ausfilterung von gröberen Anteilen der Welligkeit (DIN 4768):



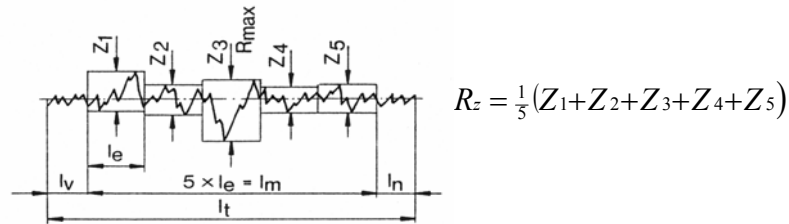
$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx$$

$l_m$  = Länge der Messstrecke

Der Nachteil des Mittenrauwertes ist, dass er weder zwischen Spitzen und Riefen unterscheiden, noch verschiedene Profilformen erkennen kann. Vorteilhaft ist, dass der Mittenrauwert auch mit einfachen analogen Oberflächenmessgeräten gut zu ermitteln und durch seine starke Mittelwertbildung gut reproduzierbar ist. Daher findet er auch eine weite Verbreitung.

Die **maximale Rautiefe ( $R_t$ )** gibt den Abstand zwischen höchster Spitze und tiefster Riefe innerhalb der Bezugsstrecke an. Dabei ist nicht von Interesse, an welchem Ort der Bezugsstrecke sich höchster und tiefster Punkt befinden, diese also nicht in direktem Bezug zueinander stehen.  $R_t$  ist für die visuelle Beurteilung einer Oberfläche von Vorteil, steht aber an Bedeutung hinter  $R_{zD}$  zurück.

Zur Beurteilung der Oberflächenstruktur ist die **gemittelte Rautiefe ( $R_{ZD}$ )** am aussagekräftigsten. Nach DIN 4768 wird das gefilterte Profil in fünf aneinander grenzende, gleich lange Strecken unterteilt, deren Länge der Grenzwellenlänge entspricht. Die gemittelte Rautiefe wird aus dem arithmetischen Mittel der maximalen Einzelrautiefen der fünf Abschnitte berechnet:



$R_{ZD}$  hat größtenteils den früher verbreiteten  $R_t$ -Wert ersetzt. Da er auf Veränderungen der Oberflächenstruktur empfindlicher reagiert, ist er besonders gut zur Verlaufskontrolle und zur Beurteilung einzelner Phasen einer Bearbeitungskette einsetzbar [Hommelwerke GmbH 1997, Jung und Borchers 1996, Maaß und Peißker 1985, Rometsch und Letzner 1993].

#### 4.3.2. Mikrohärtemessung

Die Mikro-, wie auch die Makrohärte beschreiben den Widerstand, den ein Körper dem Eindringen eines anderen entgegensetzt. Der Eindringkörper wird bei der Messung der Mikrohärte mit geringen Prüfkraften zwischen 0,01 und 2 N belastet. Da die Mikrohärte lastabhängig ist, muss die verwendete Prüflast angegeben und während einer Prüfreihe konstant gehalten werden. Der resultierende Härteeindruck wird ausgemessen und liefert nach Quotientenbildung eine Kenngröße für die Mikrohärte. Eine verbreitete Methode der Mikro-eindruck-Härtemessung ist das Prüfverfahren nach Vickers. Dabei wird als Eindringkörper eine seitengleiche, quadratische Diamantpyramide mit einem Öffnungswinkel von  $136^\circ$  verwendet. Von dem nach gleichmäßiger Belastung verbleibenden quadratischen Eindruck wird mittels eines Messschraubenokulars der Prüfvorrichtung die Diagonale vermessen. Zur Berechnung der Vickershärte dient folgende Formel:

$$HV(F[N]) = \frac{189 \cdot 10^3 F}{d^2} \quad \begin{array}{l} F = \text{angewandte Prüfkraft in N} \\ d = \text{Durchmesser in } \mu\text{m} \end{array}$$

Bei der Mikrohärtemessung muss ebenfalls die Krafthaltedauer beachtet werden. Bei harten Werkstoffen, die kaum zum Kriechen neigen, sind 10 bis 15 Sekunden Haltedauer ausreichend. In anderen Fällen muss die Zeiteinwirkung der Kraft verlängert werden.

Da bei Messungen der Mikrohärte nicht nur die angreifenden Kräfte, sondern auch der entstehende Prüfeindruck im Mikrobereich liegen, ist es möglich, verschiedene Arten der Mikrohärte in einem Gefüge zu bestimmen:



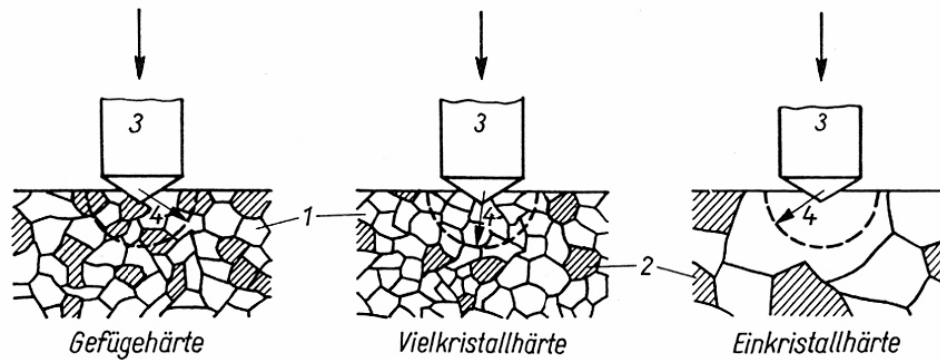


Abb. 9: Schematische Darstellung von Gefüge-, Vielkristall- und Einkristallhärte  
 1 = weicher Gefügebestandteil      2 = harter Gefügebestandteil  
 3 = Eindringkörper                      4 = Radius der Einflusszone

Die *Gefügehärte* wird bestimmt, wenn der Eindruck Anteile von mindestens zwei verschiedenen Gefügebestandteilen erfasst.

Liegt der Eindruck in einem Bereich, der mehrere Kristalle des gleichen Gefügebestandteiles umfasst, so wird die *Vielkristallhärte* gemessen.

Liegt der Eindruck in einem Mikrobereich, der nur von einem Kristalliten gebildet wird, dann spricht man von einer *Einkristallhärte*.

Aus diesem Grund kann es bei der Mehrfachmessung der Mikrohärtigkeit an einem Prüfkörper zu erheblichen Streuungen der Messwerte kommen [Blumenauer 1994, Finger 1996, Maaß und Peißker 1985, Schumann 1990, Simon und Thoma 1989].

#### 4.3.3. Lichtmikroskopische Untersuchung

Zur mikroskopischen Darstellung metallischer Objekte bedient man sich der Auflichtmikroskopie, bei der das zu betrachtende Objekt von oben beleuchtet wird. Aufgrund unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften des Objektes, z.B. der Rauigkeit, ergeben sich Phasendifferenzen, Änderungen des Polarisationszustandes, diffuse Reflexion und Streuungen, die zur Kontrastierung des mikroskopischen Bildes herangezogen werden können. Am wichtigsten sind dabei die Hell- und Dunkelfeldabbildung, die im folgenden kurz beschrieben werden sollen.

Bei der Hellfeldabbildung wird das von einem senkrecht beleuchteten Objekt regulär reflektierte Licht aufgenommen, wobei auch gebeugtes und diffus reflektiertes Licht genutzt wird, wenn es innerhalb des Öffnungsbereiches des Objektivs einfällt. Die Kontrastierung des Bildes erfolgt durch Brechzahlunterschiede des Objektdetails, wobei dieser Einfluss als gering bezeichnet werden muss, des weiteren Differenzen des Absorptionsverhaltens und vor allem der diffusen Reflexion. Da sich das Reflexionsverhalten von Metallen nicht sehr stark unterscheidet, ist es im allgemeinen notwendig, Kontrastierungsmaßnahmen wie zum Beispiel Ätzen, Bedampfen oder thermisches Nachbehandeln anzuwenden. Ansonsten können vornehmlich Kratzer und Riefen infolge diffuser Reflexion sichtbar gemacht werden. Die Hellfelduntersuchung stellt aufgrund ihrer Lichtstärke und einfachen Handhabung die Standardmethode dar und ist am weitesten verbreitet.

Im Gegensatz zur Hellfelduntersuchung werden bei der *Dunkelfeldabbildung* die regulär reflektierten Strahlen ausgespart und nur die an geneigten Flächen, also diffus reflektierten bzw. am Objekt gebeugten Strahlen genutzt. Im allgemeinen wird die Dunkelfeldbeleuchtung durch eine Ringblende und einen das Objekt umfassenden Parabolspiegel bzw. durch einseitig schräge Beleuchtung des Objektes realisiert. Mit Hilfe der Dunkelfeldabbildung können vorteilhaft mechanische Störungen wie Kratzer, Risse, Einschlüsse, Poren, Lunker oder Ausbrüche dargestellt werden [Maaß und Peißker 1985, Schatt 1991, Schumann 1990].

#### 4.3.4. Rasterelektronenmikroskopie

Das Rasterelektronenmikroskop besitzt aufgrund der Nutzung sehr kurzwelliger Elektronenstrahlen ein sehr hohes Auflösungsvermögen.

Ein äußerst feiner gesteuerter Elektronenstrahl tastet zeilenweise das Objekt ab. Im Gleichlauf mit diesem wird ein Elektronenstrahl einer Sichtrohre geführt, der das Bild zeilenweise vergrößert aufbaut. Die von jedem Objektpunkt mehr oder weniger stark reflektierten Elektronen werden einem Elektronenvervielfacher zugeführt und ergeben nach Verstärkung ein Helligkeitssignal, das die Intensität des Elektronenstrahls der Sichtrohre steuert. Es ergeben sich Objektbilder mit starker räumlicher Wirkung, welche die Oberflächenstrukturen des Objekts deutlich darstellen [Schatt 1991, Schumann 1990].

#### 4.3.5. Lichtreflexionsvermögen

Trifft Licht einer bestimmten Intensität  $I_0$  auf eine metallische Oberfläche, so wird die auftreffende Lichtmenge teilweise reflektiert ( $I_R$ ), zum anderen absorbiert. Das Verhältnis des reflektierten zum einfallenden Licht bezeichnet man als Reflexionsgrad ( $R$ ):

$$R = \frac{I_R}{I_0} \cdot 100 [\%]$$

$I_R$ =reflektiertes Licht  
 $I_0$ =eintreffendes Licht

Der Reflexionsgrad ist zum einen vom einfallenden Licht und seinen Eigenschaften abhängig, wird aber zum anderen von Objekteigenschaften des beleuchteten Metalls bestimmt. Zu den optischen Werkstoffeigenschaften gehören Brechzahl  $n$ , der Absorptionsindex  $\chi$  und deren Richtungsabhängigkeit (optische Anisotropie). Die Mikrorauigkeit bestimmt ebenfalls den Reflexionsgrad. Wenn die Untersuchungsbedingungen seitens des einfallenden Lichtes konstant gehalten werden, indem mit Licht gleichbleibender Intensität senkrecht beleuchtet wird und ebenfalls die optischen Werkstoffparameter pro Materialgruppe als konstant angesehen werden können, bleibt die Abhängigkeit des Reflexionsgrades von der Mikrorauigkeit. Somit dient die Messung des Reflexionsvermögens als objektiver Parameter zur Beurteilung der Oberflächengüte und zur Einschätzung der Wirksamkeit verschiedener Polierverfahren.

Die subjektive Einschätzung einer "glänzenden Oberfläche" ist gekennzeichnet von einer gerichteten Reflexion des einfallenden Lichtes. Ist die Oberflächenrauigkeit größer als die

Wellenlänge des beleuchtenden Lichtes, so wird das einfallende Licht diffus zurückgeworfen. Je geringer die Rauigkeit ist, um so gerichteter erfolgt die Reflexion und um so mehr glänzt eine metallische Oberfläche. Ein Hochglanz wird erreicht, wenn die Oberflächenrauigkeit maximal  $0,25\ \mu\text{m}$  beträgt. Dieser Wert liegt deutlich unter der Wellenlänge des sichtbaren Lichtes ( $0,4 - 0,7\ \mu\text{m}$ ). Die Messung des Reflexionsgrades gibt somit das Reflexions- oder Glanzvermögen einer metallischen Oberfläche wieder [Fensterseifer 1993, Maaß und Peißker 1985, Petzold 1978, Schumann 1990].

#### 4.3.6. Metallographie

Die Metallogie (Metallkunde) ist die Lehre und Erforschung von Eigenschaften der Metalle und Metalllegierungen. Sie bedient sich vorzugsweise der mikroskopischen Gefügeuntersuchung und Beschreibung des Kristallaufbaus, der Metallographie. Um Aussagen über die Kristallstruktur eines metallischen Gefüges erhalten zu können, bedarf es einer besonderen Vorbehandlung der Prüfkörper. Dazu fertigt man Schlitze der Proben an, die im Anschluss eingebettet und hochglanzpoliert werden. So können Oberflächenstrukturen, Lunker, Einschlüsse und Risse beurteilt werden. Sollen die Gefügestrukturen und der Kristallaufbau der Legierung deutlich gemacht werden, so muss eine legierungsspezifische Ätzung der Schlitze erfolgen [Blumenauer 1994, Schatt 1991, Schumann 1990, Weck und Leistner 1986].

### 4.4. Prüfverfahren

#### 4.4.1. Messtechnische Prüfverfahren

##### 4.4.1.1. Profilographische Untersuchungen

Die Oberflächenrauigkeit wurde nach dem Tastschnittmessverfahren mit Hilfe des Hommeltester T1000® (Hommelwerke GmbH, Schwenningen) erfasst. Die Messgrößen wurden nach DIN 4768 und ISO 4287 durch das Gerät ermittelt.

Einstellung des Gerätes:

- Messstrecke (Taststrecke):  $1,25\text{mm}$
- Vorlaufstrecke:  $0,25\text{mm}$
- Grenzwellenlänge:  $0,25\text{mm}$
- Ermittlung der Parameter gemittelte Rautiefe ( $R_{ZD}$ ), maximale Rautiefe ( $R_t$ ), Mittenrauwert ( $R_a$ ) und mittlerer Spitzenabstand ( $S_m$ )

Je Oberflächenzustand erfolgten 10 zueinander parallel verlaufende Messungen, wobei je Prüfkörperseite maximal 5 Messungen durchgeführt wurden. Nach jeder Messreihe wurden die Messdaten durch den Hommeltester statistisch zusammengefasst und ausgewertet. Es erfolgte der Ausdruck eines für die Messreihe charakteristischen Profils [Hommelwerke GmbH 1997].

#### 4.4.1.2. Mikrohärte

Die Messungen erfolgten im Mikrohärtebereich (MHV 0,02) unter Verwendung der Mikrohärte-Prüfeinrichtung H der Firma Carl Zeiss (Jena). Die Diamantpyramide wurde mit einer konstanten Kraft von 0,2 N auf die zu prüfende Fläche gebracht. Die Dauer der Krafteinwirkung betrug jeweils 10 Sekunden.

Die Messungen der Mikroeindruckhärte erfolgten an Oberflächen und an Querschliffen ausgewählter Prüfkörper in Abständen von 10µm, 20µm, 50µm, 100µm, 200µm von der Oberfläche und in der Prüfkörpermitte. Von jeweils 10 Messungen pro Oberflächenabstand wurden die Mittelwerte und die Standardabweichung gebildet sowie die Ergebnisse statistisch ausgewertet.

#### 4.4.1.3. Bestimmung des Reflexionsvermögens

Um eine quantitative Einschätzung des Glanzvermögens zu erhalten, wurde bei allen Prüfkörpern das Reflexionsvermögen wie folgt beschrieben ermittelt:

Die Untersuchungen erfolgten mittels der Mikrofotoeinrichtung mf-matik am Auflicht-Mikroskop Epival interphako und der Belichtungsautomatik BA 2 der Firma Carl Zeiss Jena. Dabei wird unabhängig von der vom darzustellenden Objekt reflektierten Lichtmenge dem Film eine konstante Beleuchtungsstärke zugeführt. Da die Belichtung dem Produkt aus Beleuchtungsstärke und Belichtungszeit entspricht, ist das Reflexionsvermögen der Belichtungszeit direkt proportional. Dies bedeutet, dass durch Messung der einem Prüfkörper entsprechenden Belichtungszeit Aussagen über dessen Reflexions- also Glanzvermögen getroffen werden können. Um Fremdlichtbeeinflussungen zu vermeiden, war die Kondensorfassung des Objektives mit einer dem Objektisch aufliegenden Gummimanschette umgeben. Bei den Messungen diente ein sandgestrahlter Prüfkörper (Korund 250µm) der Legierung Wisil als Bezugsgröße, und eine Belichtungszeit von 100 Sekunden wurde einem relativen prozentualen Reflexionsvermögen von 0% gleichgesetzt. Die Differenz zwischen der Bezugszahl 100 und der gemessenen Belichtungszeit in Sekunden stellt somit das relative prozentuale Reflexionsvermögen dar. Die Messungen erfolgten bei Hellfeldbeleuchtung und einer Gesamtvergrößerung von 12,5 sowie bei Schalterstellung 28 der Belichtungsautomatik. Je Oberflächenzustand wurden 10 Messungen durchgeführt, von denen das arithmetische Mittel zur Charakterisierung des Oberflächenglanzes herangezogen wurde.

#### 4.4.2. Bildgebende Untersuchungen

##### 4.4.2.1. Auflichtmikroskopische Untersuchungen

Um eine erste Einschätzung der Oberflächenqualität geben zu können, wurden die Prüfkörperoberflächen und -querschliffe unter dem Auflichtmikroskop Axiotech (Carl Zeiss Jena) im Hell- und Dunkelfeld betrachtet. Charakteristische Stellen wurden in den Vergrößerungen 25-, 100-, 200- und 500fach fotografiert.

##### 4.4.2.2. Untersuchungen im Rasterelektronenmikroskop (REM)

Die Untersuchungen erfolgten an Oberflächen der Prüfkörper mit dem Rasterelektronenmikroskop 515 (Philips). Die für den Oberflächenzustand charakteristischen Bereiche wurden fotografisch dokumentiert. Die Aufnahmen erfolgten in 600-, 1200- und 2400facher Vergrößerung.

##### 3.4.2.3. Metallographie

Metallographische Untersuchungen erfolgten an Querschliffen durch Prüfkörper der mit dem Micro-Finishing und Ecoclean bearbeiteten Proben, um mögliche Auswirkungen der Bearbeitungsverfahren auf die Randschichten zu erfassen.

Für die metallographischen Untersuchungen wurden ausgewählte Prüfkörper unter Vermeidung von Hitze (Wasserkühlung) mittig getrennt und im Anschluss in Epoxidharz (Epofix, Struers) eingebettet. Nach Aushärtung des Harzes erfolgte der Grob- und Feinschliff mit SiC-Papier der Körnungen 220, 600 und 1200 auf dem Nassschleifgerät DAP-V (Struers). Abschließend wurden die Proben legierungsspezifisch poliert.

##### 1. Metallographische Bearbeitung der Goldlegierung

Nach dem Grob- und Feinschliff erfolgte die Politur mit Diamantsuspension der Körnungen 15µm, 6µm, 3µm und mit OP-S. Die Proben wurden gereinigt, mit Ethanol entfettet und getrocknet. Danach wurden auflichtmikroskopische Aufnahmen angefertigt und die Mikrohärtemessungen durchgeführt.

Die metallographischen Untersuchungen wurden an den Versuchsreihen Micro-Finishing/Degudent H an den Proben im Gusszustand und nach deren Strahlbehandlung vorgenommen. In den Reihen Ecoclean/Degudent H wurden die vorgeschliffenen Proben (220er Nassschliff) vor und nach Badbehandlung untersucht.

##### 2. Metallographische Bearbeitung der Kobaltbasis - Legierung

Die bis zur 1200er Körnung feingeschliffenen Proben wurden mit Diamantsuspension der Körnungen 9µm, 6µm, 1µm und OP-S poliert. Nach Reinigung, Entfettung und Trocknung erfolgten die mikroskopische Auswertung und Mikrohärteprüfung.

In den Versuchsreihen Micro-Finishing/Remanium GM 380 wurden Proben im Gusszustand und mit vorgeschliffenen Oberflächen (220er Nassschliff) vor und nach dem Abstrahlen metallographisch ausgewertet. In den Ecoclean – Versuchsreihen kamen korundgestrahlte Prüfkörper vor und nach Badbehandlung zur Auswertung.

### 3. Metallographische Bearbeitung der Titanproben

Bei den Titanproben erfolgte zusätzlich zur metallographischen Politur eine spezielle Gefügeentwicklung, um materialspezifische Strukturen darzustellen. Hierzu wurden nach vorbereitendem Nassschliff die Prüfkörper mittels der Politur nach Müller poliert. Dieses Polierverfahren arbeitet unter Einfluss von Wasserstoffperoxid, Salpetersäure und Flußsäure. Das Poliermittel weist folgende Zusammensetzung auf [Leistner 1988]:

#### **Politur nach Müller**

260 ml	OP-S
40 ml	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
1 ml	HNO <sub>3</sub>
0,5 ml	HF.

Nach Reinigung, Entfettung mit Ethanol und Trocknung erfolgte bei den ungeätzten Proben die Mikrohärteprüfung. Der andere Teil wurde mit dem Farbätzverfahren nach Weck bearbeitet. Durch dieses Verfahren werden  $\alpha$ -Titanmischkristallite entsprechend ihrer Orientierung zur Schlifffläche braun-blau gefärbt. Dagegen erscheinen  $\beta$ -Mischkristallite, Hydrid-, Nitridnadeln und sauerstoffreiche Zonen weiß. Die Farbätzung nach Weck setzt sich aus folgenden Bestandteilen zusammen [Weck und Leistner 1986]:

#### **Farbätzung nach Weck**

100 ml	dest. Wasser
50 ml	Ethanol 96%
2 g	Ammoniumbifluorid.

Nach erfolgter Ätzung wurden die Proben im Auflichtmikroskop ausgewertet und charakteristische Bereiche fotografisch dokumentiert.

Bei den Micro-Finishing-Versuchsreihen wurden die Prüfkörper aller Ausgangs- und Bearbeitungszustände metallographisch aufbereitet und untersucht. Die mit dem Ecoclean – Verfahren bearbeiteten Proben wurden im korundgestrahlten Zustand vor und nach Badbehandlung ausgewertet.

#### 4.5. Statistische Überprüfung

Da die bildgebenden Prüfverfahren ausschließlich deskriptiven Charakter haben, wurden nur Ergebnisse der messtechnischen Prüfverfahren statistisch bearbeitet.

Für die statistische Auswertung wurden zunächst Mittelwerte der Prüfreiheiten gebildet und die Standardabweichung ermittelt.

Die *Standardabweichung* oder Streuung ist ein Maß für die Variationsbreite entsprechend des Stichprobenumfanges und wird wie folgt berechnet:

$$S = \sqrt{\frac{\text{Summe der Abweichungsquadrate}}{\text{Anzahl der Freiheitsgrade}}}$$

(bei einem Stichprobenumfang von n ist die Anzahl der Freiheitsgrade gleich n-1)

Bei der Auswertung der Profilwerte wurde zusätzlich der *t-Test nach Student* angewendet. Über die Ermittlung der t-Werte kann geklärt werden, ob der Unterschied zweier normal verteilter Stichproben signifikant ist oder nicht. Dazu werden zwei Stichproben des Umfanges  $n_A$  und  $n_B$ , sowie deren Mittelwerte  $m_A$  und  $m_B$  gegenübergestellt und folgende Hypothesen aufgestellt:

1. Die wahren Mittelwerte sind gleich, ein Unterschied der Mittelwerte ist nur zufallsbedingt (Nullhypothese;  $H_0$ ).
2. Die wahren Mittelwerte sind tatsächlich verschieden.

Die Nullhypothese ist bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  anzunehmen, wenn der Betrag des tabellarisch festgelegten t-Wertes bei  $F = n_A + n_B - 2$  Freiheitsgraden kleiner/gleich dem Betrag des berechneten t-Wert ist, bzw. der errechnete t-Wert ( $t_{err}$ ) den absoluten Betrag des tabellarischen t-Wertes ( $t_{tab}$ ) überschreitet (zweiseitige Fragestellung;  $t_{err} > |\pm t_{tab}|$ ). Liegt  $t_{err}$  außerhalb dieser Richtlinien, muss die Nullhypothese abgelehnt werden. Es trifft dann die zweite Hypothese zu, indem ein Unterschied beider Stichproben als signifikant bestätigt, also statistisch gesichert wurde. Die Berechnung der t-Werte erfolgte nach folgenden Formeln:

$$t_{err} = \frac{m_A - m_B}{S_G} \cdot \sqrt{\frac{n_A \cdot n_B}{n_A + n_B}}$$

für  $m_A / m_B$  = Mittelwerte der Stichproben

$n_A / n_B$  = Stichprobenumfang

$$S_G = \sqrt{\frac{s_A^2(n_A - 1) + s_B^2(n_B - 1)}{n_A + n_B - 2}}$$

$s_A / s_B$  = Standardabweichung der Stichproben

Die errechneten t-Werte wurden tabellarisch aufgestellt und die Resultate in Schemata dargestellt [Cavalli-Sforza 1969, Grimm und Recknagel 1985].

## 5. ERGEBNISSE








### 5.1. Micro-Finishing

#### 5.1.1. Metrisch erfassbare Größen

##### 5.1.1.1. Profilanalyse

Bei der profilographischen Untersuchung der Metalloberflächen wurden die Parameter gemittelte Rautiefe ( $R_{ZD}$ ), arithmetischer Mittenrauwert ( $R_a$ ), maximale Rautiefe ( $R_t$ ), und mittlerer Rillenabstand ( $S_m$ ) erfasst, um eine breite Vergleichsmöglichkeit mit anderen Publikationen bieten zu können. Für die Beurteilung und den Vergleich innerhalb dieser Arbeit soll jedoch vorwiegend auf die gemittelte Rautiefe und den mittleren Rillenabstand eingegangen werden. Die mittleren Werte von  $R_{ZD}$ ,  $R_a$ ,  $R_t$  und  $S_m$  (arithmetisches Mittel aus 10 Einzelmessungen pro Oberflächenzustand) und deren Streuung werden in Tabelle A im Anhang aufgeführt. Die für die Ergebnisdarstellung herangezogenen Werte ( $R_{ZD}$  und  $S_m$ ) sollen in den Abbildungen 10 bis 21 graphisch veranschaulicht werden.

#### Farbcodierung in den Diagrammen der Profilanalyse:

 Degudent H, Guss	 Bearbeitung mit SM 1	 Standardabweichung
 Remanium GM380, Guss	 Bearbeitung mit SM 2	
 Titan, Guss	 Bearbeitung mit SM 1+2	

Die **hochgoldhaltige Legierung** Degudent H zeigt im Gusszustand (Abb. 10) eine ähnliche gemittelte Rautiefe wie Titan (Degudent H:  $R_{ZD}=9,8\mu\text{m}$ ); beide liegen unter der Kobaltbasislegierung. Wird Degudent H mit dem abrasiven Strahlmedium bearbeitet, kommt es zunächst zu einer Vergrößerung des mittleren Rillenabstandes ( $S_m=89,4\mu\text{m}$ ) und einer größeren mittleren Rautiefe ( $R_{ZD}=10,7\mu\text{m}$ ). Durch die alleinige Bearbeitung mit dem Kugelstrahlmedium kann dagegen die mittlere Rautiefe reduziert werden ( $R_{ZD}=8,3\mu\text{m}$ ) und liegt ebenfalls unter der mittleren Rautiefe nach kombinierter Bearbeitung mit SM1 + SM2 ( $R_{ZD}=9,8\mu\text{m}$ ). Der mittlere Rillenabstand nach alleiniger Kugelstrahlbehandlung und kombinierter Bearbeitung liegt oberhalb des Gusszustandes, erreicht jedoch nicht die Werte nach Bearbeitung mit SM1.

Bei Bearbeitung der mit Nassschleifpapier 220er Körnung vorgeschliffenen Oberflächen ( $R_{ZD}=3,6\mu\text{m}$ ) zeigt sich eine Erhöhung der mittleren Rautiefe bei alleiniger Bearbeitung mit Strahlmedium 1 ( $R_{ZD}=4,2\mu\text{m}$ ) und Strahlmedium 2 ( $R_{ZD}=5,2\mu\text{m}$ ) (Abb. 11). Bei Kombination beider Medien kann der Ausgangswert annähernd erreicht werden. Der mittlere Rillenabstand liegt in allen drei Fällen oberhalb des Ausgangswertes ( $S_m=20,0\mu\text{m}$ ) und ist bei alleiniger Kugelstrahlbehandlung am höchsten ( $S_m=36,8\mu\text{m}$ ).

Durch die Bearbeitung mit dem Medium 2 nach vorherigem Schliff mit SiC-Schleifpapier der Körnungen 600 und 1200 (Abb. 12) wird das Profil stark aufgeraut. Die mittlere Rautiefe steigt auf das 3- bis 6-fache ihres Ausgangswertes. Die deutliche Aufrauung der Oberfläche kann auch durch einen erhöhten mittleren Rillenabstand nicht mehr ausgeglichen werden.



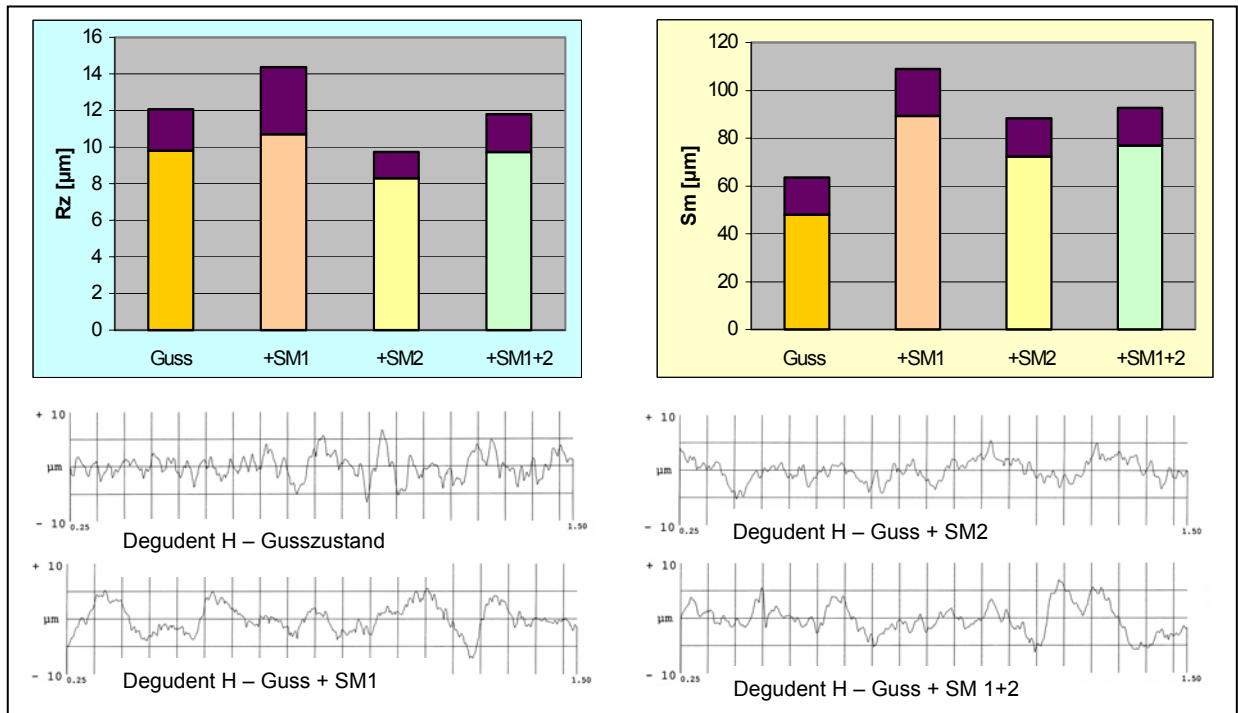


Abb. 10: Ergebnisse profilographischer Untersuchungen (gemittelte Rautiefe  $R_{ZD}$  und mittlerer Rillenabstand  $S_m$ , Profilschriebe) von Gussproben des Degudent H vor und nach dem Micro-Finishing

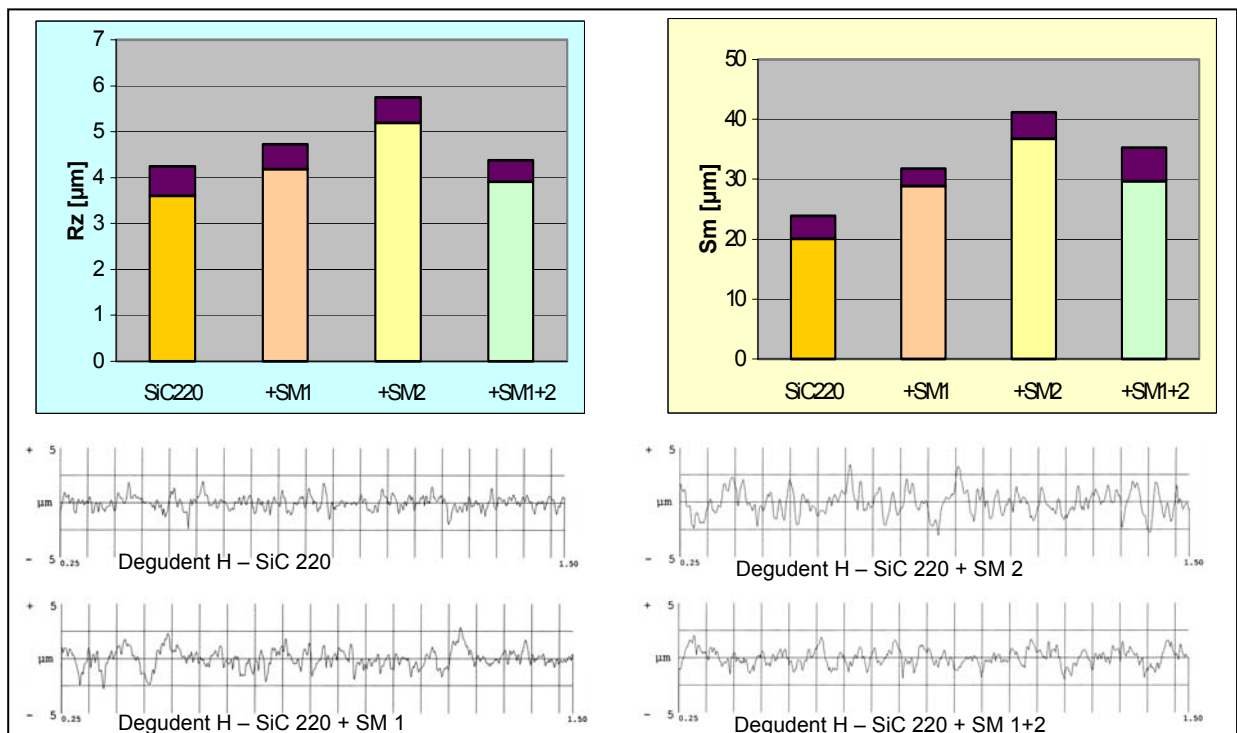


Abb. 11: Ergebnisse profilographischer Untersuchungen ( $R_{ZD}$ ,  $S_m$ , Profilschriebe) der vorgeschliffenen (220er Nassschliff) Oberflächen von Degudent H-Gussproben vor und nach Micro-Finishing

Die statistische Auswertung der Rautiefen im Gusszustand und dessen Bearbeitung (Abb. 13) zeigen zwischen keinem der Zustände signifikante Unterschiede. Lediglich der mittlere Rillenabstand weist statistisch gesicherte Unterschiede zwischen dem Guss und der separaten Bearbeitung mit SM1 sowie SM2 auf.

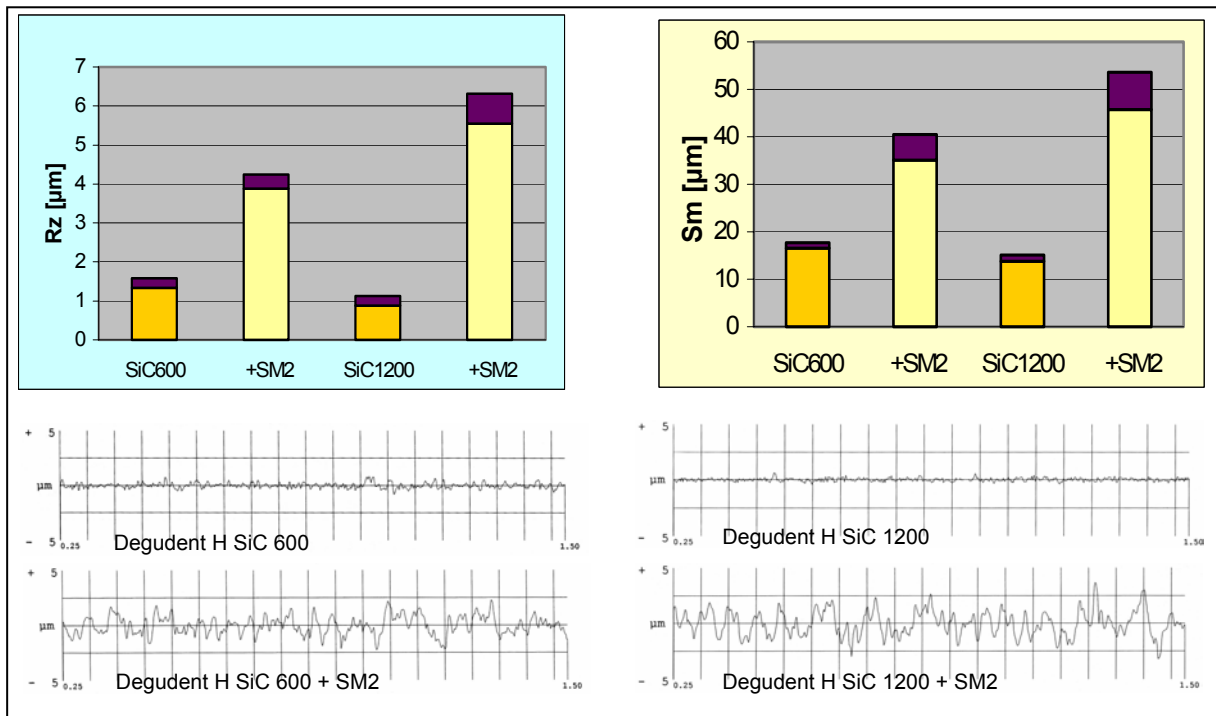


Abb. 12: Ergebnisse profilographischer Untersuchungen ( $R_{ZD}$ ,  $S_m$ , Profilschriebe) der feingeschliffenen Oberflächen von Degudent H-Gussproben vor und nach Micro-Finishing

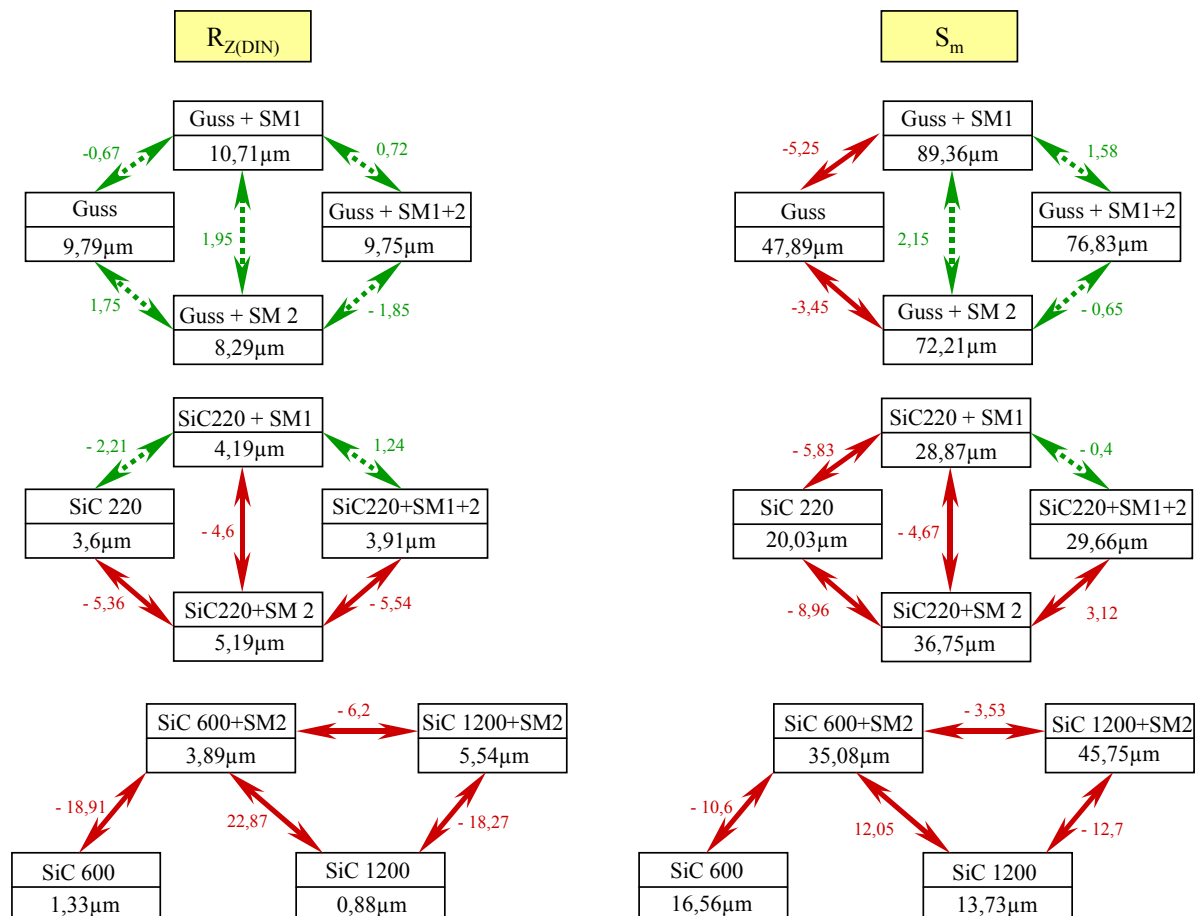


Abb. 13: Statistische Auswertung der Profilwerte der Degudent H Proben anhand des t-Testes; zweiseitige Fragestellung; Irrtumswahrscheinlichkeit: 1%;  $t_{tab}=2,88$ ;  $FG=18$

→ =signifikant, ↔ =nicht signifikant

Die statistische Auswertung der Ergebnisse für die mittlere Rautiefe der mit 220er Korundpapier vorgeschliffenen Oberfläche zeigt keinen signifikanten Unterschied zwischen dem Ausgangszustand, dessen Bearbeitung mit dem abrasiven Medium und der Anwendung beider Strahlmittel. So kann ein ähnlicher End- wie Ausgangszustand in bezug auf die Rauigkeit bestätigt werden. Die Unterschiede vor und nach Bearbeitung der mit SiC600 und SiC1200 vorgeschliffenen Oberfläche sind alle statistisch gesichert.

Bei Untersuchung der **Kobaltbasislegierung** Remanium GM380 fällt eine besonders deutliche Reduzierung der Rautiefen nach Bearbeitung der gegossenen Oberfläche auf (Abb. 14). Die mittlere Rautiefe ( $R_{ZD}=19,9\mu\text{m}$ ) wird allein durch das abrasive Medium auf etwa ein Drittel reduziert ( $R_{ZD}=5,7\mu\text{m}$ ), die Kombination beider Strahlmedien bewirkt eine Reduktion auf etwa ein Viertel der Ausgangswerte der gemittelten Rautiefe ( $R_{ZD}=5,0\mu\text{m}$ ). Betrachtet man den mittleren Rillenabstand, so ist bei Bearbeitung des gegossenen Zustandes ebenfalls eine deutliche Verbesserung durch einen vergrößerten Rillenabstand festzustellen.

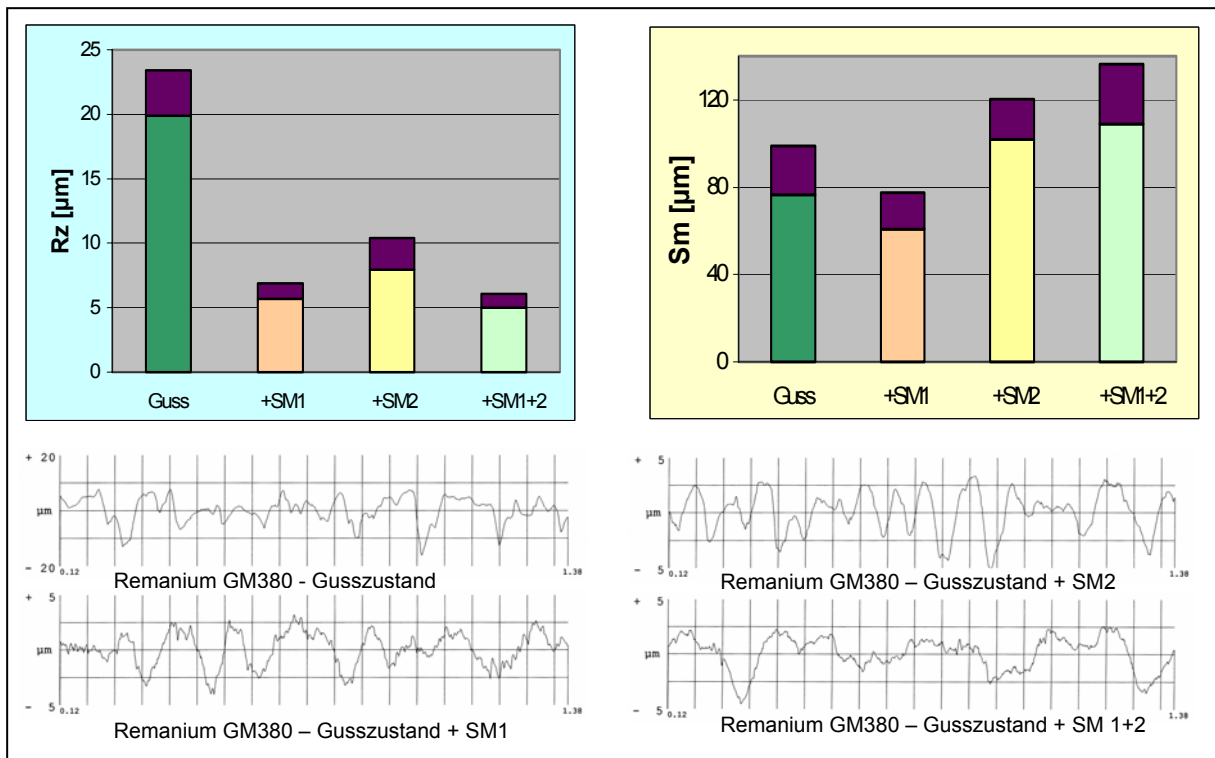


Abb. 14: Ergebnisse profilographischer Untersuchungen ( $R_{ZD}$ ,  $S_m$ , Profilschriebe) von Gussproben des Remanium GM380 vor und nach dem Micro-Finishing

Bei der Bearbeitung der Kobaltbasislegierung im vorgeschliffenen Zustand sind sowohl bei Vorschleiff mit Korundpapier der Körnungen 220 (Abb. 15), als auch 600 und 1200 (Abb. 16), erhöhte Rauigkeitswerte im Vergleich zum Ausgangszustand ermittelt worden. Auch diese erhöhten Rauigkeiten können durch einen vergrößerten Rillenabstand nicht ausgeglichen werden.

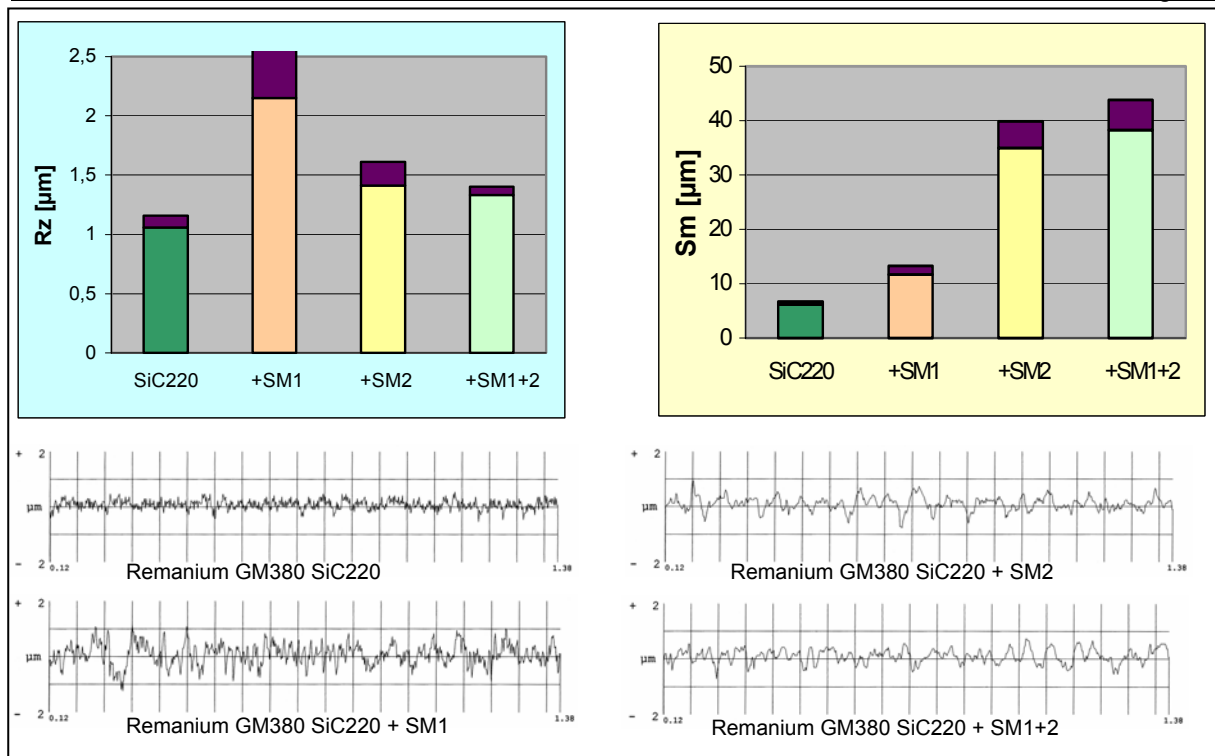


Abb. 15: Ergebnisse profilographischer Untersuchungen ( $R_{\text{ZD}}$ ,  $S_{\text{m}}$ , Profilschriebe) der vorgeschliffenen (220er Nassschliff) Oberflächen von Remanium GM380-Gussproben vor und nach Micro-Finishing

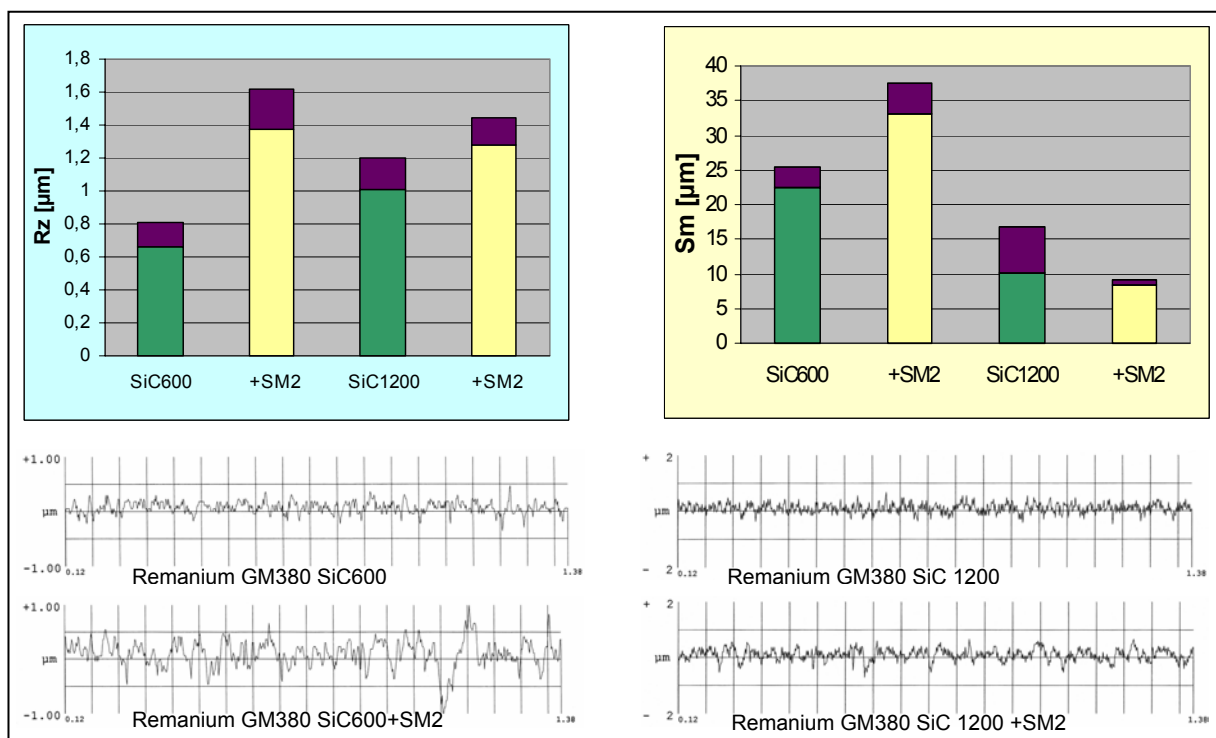


Abb. 16: Ergebnisse profilographischer Untersuchungen ( $R_{\text{ZD}}$ ,  $S_{\text{m}}$ , Profilschriebe) der feingeschliffenen Oberflächen von Gussproben des Remanium GM380 vor und nach Micro-Finishing

Die statistische Auswertung der Ergebnisse (Abb. 17) zeigt für die Bearbeitung des gegossenen Zustandes, dass die mittlere Rautiefe durch das Strahlmedium 1 sowie 2 signifikant verringert wird. Kein signifikanter Unterschied der Rautiefe besteht zwischen der alleinigen Bearbeitung mit dem abrasiven und dem Kugelstrahlmedium, während der Unterschied zwischen der mit Kugeln bearbeiteten Oberfläche und der durch Kombination

beider Medien bearbeiteten Oberfläche statistisch gesichert ist. Dies bestätigt den wenig abtragenden Effekt des Kugelstrahlmediums durch eine weniger reduzierte Rautiefe. Betrachtet man die statistische Auswertung des mittleren Rillenabstandes, so zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen dem Gusszustand und dessen Bearbeitung mit dem Strahlmedium 1, sowie zwischen alleiniger Bearbeitung mit dem Kugelstrahlmedium und der Kombination beider Medien. Dagegen ist die deutliche Erhöhung des mittleren Rillenabstandes durch Anwendung des Kugelstrahlmediums (alleine oder in Kombination) statistisch gesichert. Dies bestätigt den die Oberfläche einebnenden Effekt der Strahlkugeln. Interessante Rückschlüsse sind auch durch die statistische Auswertung der Profilwerte im vorgeschliffenen Zustand zu erzielen: Während die mittlere Rautiefe der mit SiC1200 vorgeschliffenen Oberflächen nach Bearbeitung mit dem Kugelstrahlmedium signifikant steigt, ist der Unterschied zwischen vorgeschliffener und bestrahlter Oberfläche bei dem mittleren Rillenabstand nicht statistisch gesichert.

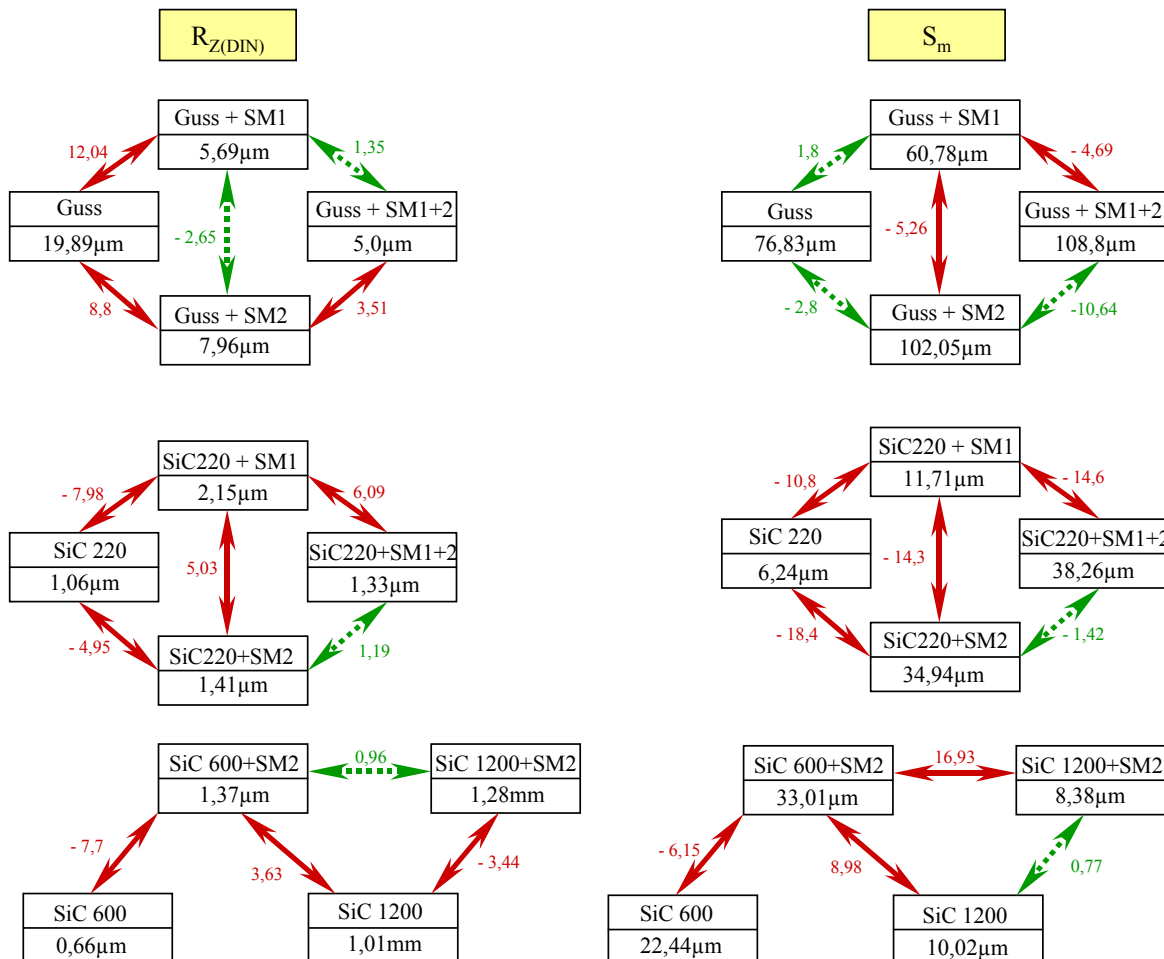


Abb. 17: Statistische Auswertung der Profilwerte der Remanium GM380 Proben anhand des t-Testes; zweiseitige Fragestellung; Irrtumswahrscheinlichkeit: 1%;  $t_{\text{tab}}=2,88$ ; FG=18  
 → =signifikant, ↔ =nicht signifikant

Auch die Bearbeitung des **Titans** im Gusszustand durch Micro-Finishing (Abb. 18) erweist sich als deutlich effektiver als die Bearbeitung der vorgeschliffenen Oberflächen. Durch das abrasive Strahlen der Gussoberfläche kann die mittlere Rauigkeit des Titans von  $R_{\text{ZD}}=10,7\mu\text{m}$  auf  $R_{\text{ZD}}=5,9\mu\text{m}$  reduziert werden. Eine Kombination beider Strahlmittel bewirkt eine geringere Einebnung ( $R_{\text{ZD}}=6,8\mu\text{m}$ ), die aber noch unter der nach alleiniger Bestrahlung

mit dem sphärischen Medium liegt ( $R_{ZD}=7,0\mu\text{m}$ ). Der mittlere Rillenabstand ist ebenfalls in deutlichem Maße ansteigend (von  $S_m=50,2\mu\text{m}$  im Gusszustand auf  $S_m=122,8\mu\text{m}$  nach Bearbeitung mit SM1 und SM2) und unterstützt die Aussage einer starken Einebnung der Oberfläche nach Bearbeitung des Gusszustandes.

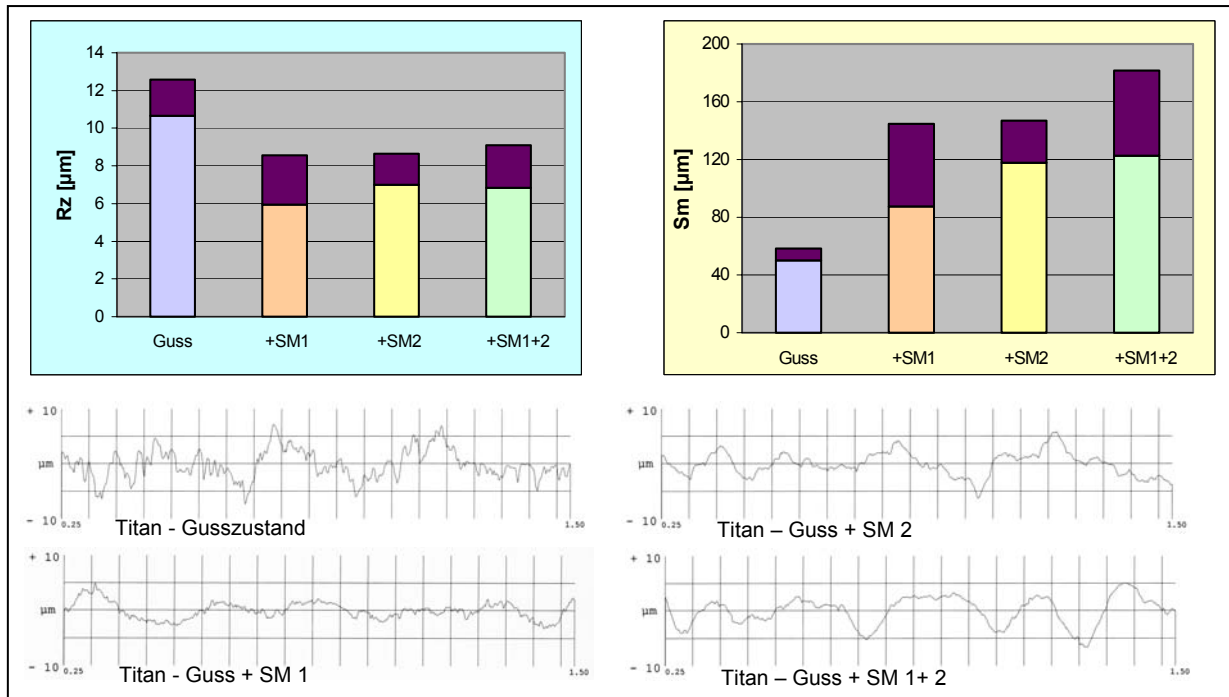


Abb. 18: Ergebnisse profilographischer Untersuchungen ( $R_{ZD}$ ,  $S_m$ , Profilschriebe) von Gussproben des Titan vor und nach dem Micro-Finishing

Durch die statistische Auswertung der Ergebnisse (Abb. 21) konnten zwischen den bearbeiteten Oberflächenzuständen untereinander sowohl bei der mittleren Rautiefe, als auch beim mittleren Rillenabstand keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden, was durch eine hohe Streuung der Einzelmesswerte erklärt werden kann. Jedoch ist der Unterschied gegenüber dem Ausgangszustand (gegossene Titanoberfläche) statistisch gesichert, wodurch ein positiver Effekt der Bearbeitung durch das Micro-Finishing bestätigt wird.

Die Anwendung des Micro-Finishing auf vorgeschliffene Titanoberflächen (SiC-Papier der Körnungen 220, 600 und 1200) wirkt sich wie bei der Kobaltbasis- und der Goldlegierung in negativem Sinne aus (Abb. 19 und 20). Die Absolutwerte der Endraugigkeiten liegen zwar über denen nach Bearbeitung des Gusszustandes, jedoch ist in jedem Fall eine Verschlechterung gegenüber dem Ausgangszustand eingetreten. Unterstützt wird diese Aussage durch die statistische Bearbeitung der Messergebnisse (Abb. 21). Gegenüber dem vorgeschliffenen Ausgangszustand (SiC220, SiC600 und SiC1200) wird bei dem jeweilig nächsten Bearbeitungsschritt die Oberfläche zunächst aufgeraut, welches wiederum durch eine meist geringe Erhöhung des mittleren Rillenabstandes nicht ausgeglichen werden kann.

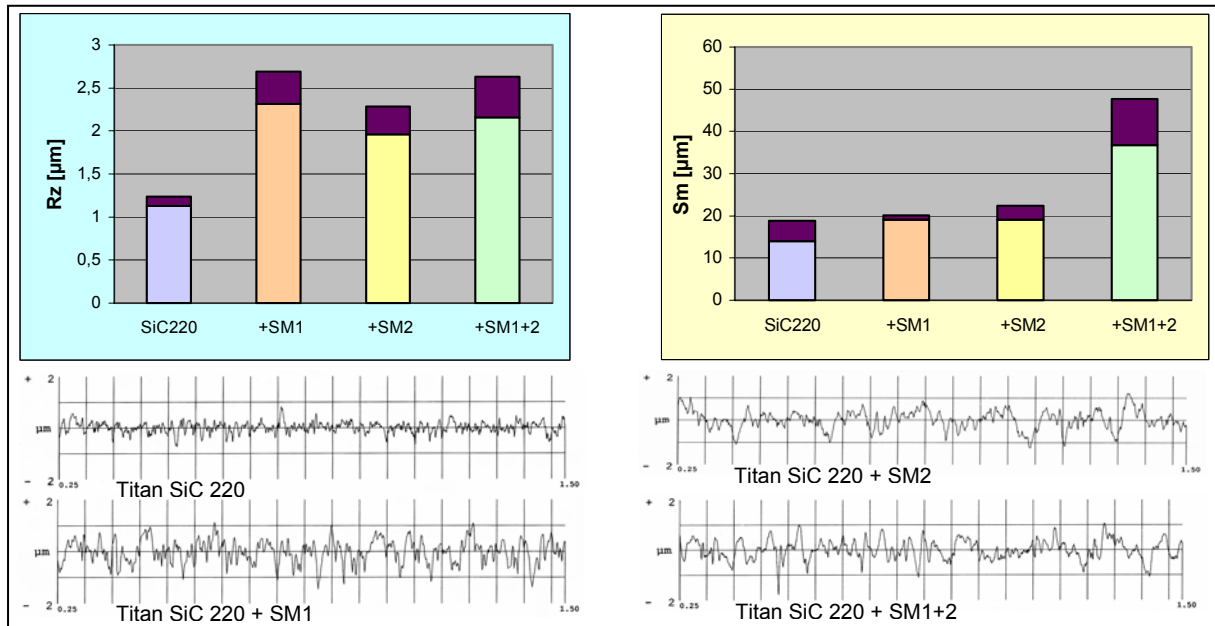


Abb. 19: Ergebnisse profilographischer Untersuchungen ( $R_{ZD}$ ,  $S_m$ , Profilschriebe) der vorgeschliffenen (220er Nassschliff) Oberflächen von Titan-Gussproben vor und nach Micro-Finishing

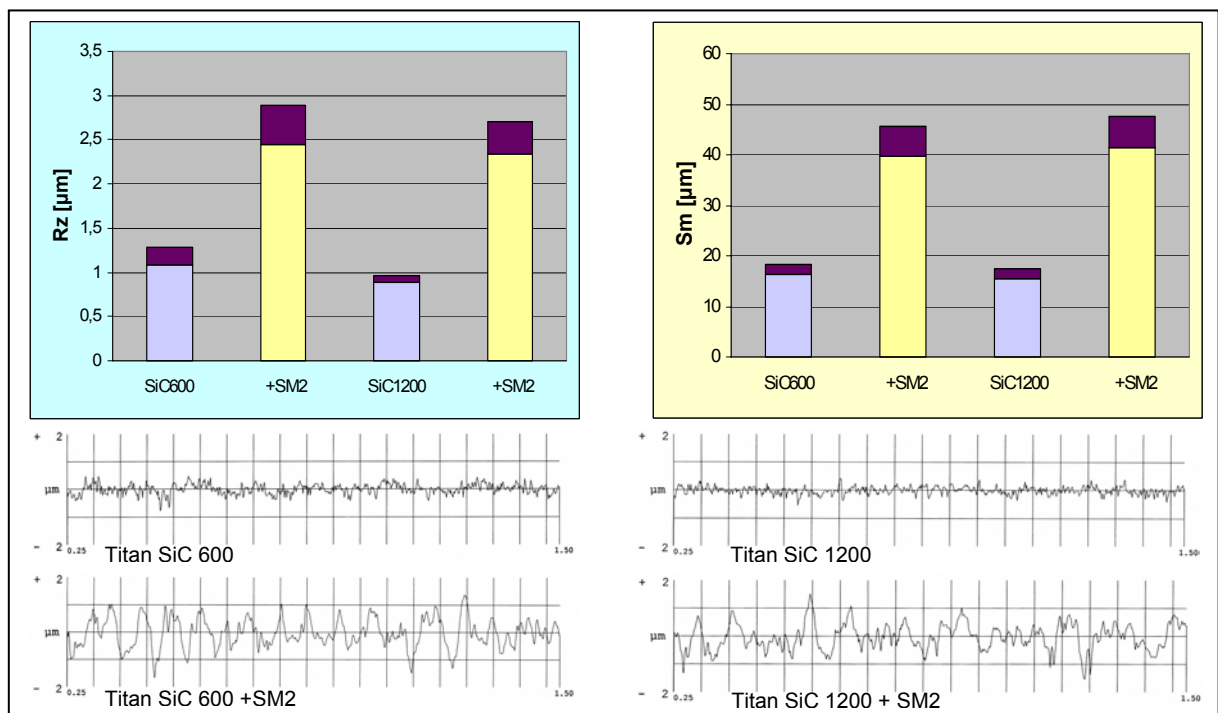


Abb. 20: Ergebnisse profilographischer Untersuchungen ( $R_{ZD}$ ,  $S_m$ , Profilschriebe) der feingeschliffenen Oberflächen von Gussproben des Titans vor und nach Micro-Finishing

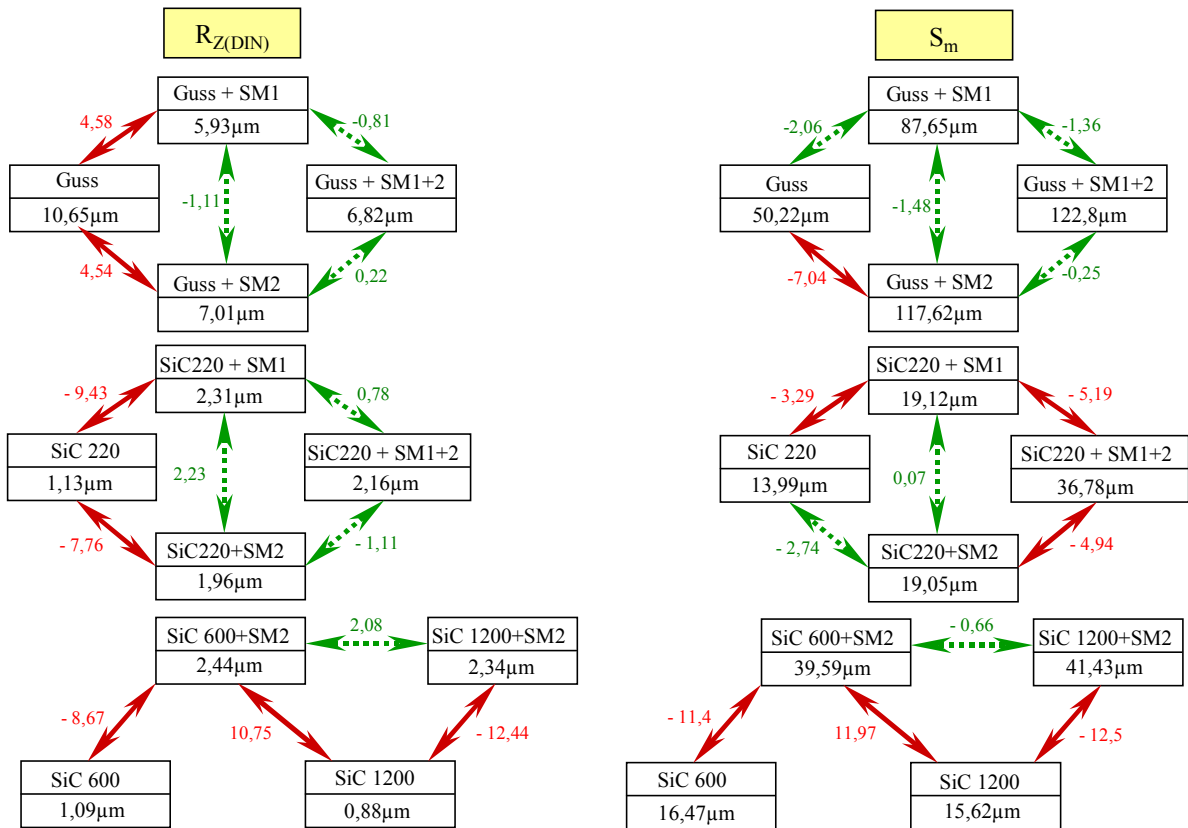


Abb. 21: Statistische Auswertung der Profilwerte der Biotan Proben anhand des t-Testes; zweiseitige Fragestellung; Irrtumswahrscheinlichkeit: 1%;  $t_{\text{tab}}=2,88$ ; FG=18  
 → =signifikant, ← =nicht signifikant

#### 5.1.1.2. Glanzgrad

Die Messung des Reflexionsvermögens soll die subjektive Empfindung einer "glänzenden Oberfläche" in einer metrisch erfassbaren Größe wiedergeben. Die ermittelten Messwerte werden in der Tabelle 6 und den Diagrammen der Abbildungen 22-24 dargestellt.

Tab. 6: Ergebnisse der Glanzgradmessungen [%] der mit dem Micro-Finishing Verfahren bearbeiteten Prüfkörper

Ausgangs zustand	DEGUDENT				REMANIUM				TITAN			
	Guss	SM1	SM2	SM1+2	Guss	SM1	SM2	SM1+2	Guss	SM1	SM2	SM1+2
<b>Guss</b>	n.m.	38	44,8	45,6	37,4	36,6	51	59	39,6	42,1	54,9	52,1
<b>SiC220</b>	68,2	41,6	44,4	33,5	90,8	43,6	67,5	60,7	87,6	35,6	54,7	46,9
<b>SiC600</b>	65,4		38,6		89,8		65,6		89,6		48,9	
<b>SiC1200</b>	76,5		37,4		88		70		87,6		53,2	

Bei dem Vergleich der untersuchten metallischen Dentalwerkstoffe konnten ähnliche Effekte des Micro-Finishing festgestellt werden. Daher soll hier auf die Ergebnisse der drei Werkstoffe gemeinsam eingegangen werden. Ein deutlicher Unterschied des Glanzvermögens konnte nach Bearbeitung der gegossenen gegenüber der Bearbeitung der vorgeschliffenen Metalloberfläche nachgewiesen werden.



Die Bearbeitung der gegossenen Oberfläche der **hochgoldhaltigen Legierung**, der **Kobaltbasislegierung** und des **Titans** wirkt sich positiv auf den Glanzgrad aus. Dabei steigt der Glanzgrad bei der Bearbeitung der Kobaltbasislegierung von 37,4% im Gusszustand auf 59% nach Anwendung beider Strahlmedien. Das Titan zeigt im gegossenen Ausgangszustand einen Glanzgrad von 39,6%, welcher durch die Bearbeitung mit beiden Strahlmedien auf einen Wert von 52,1% steigt. Der Glanzgrad der Goldlegierung im Gusszustand konnte nicht gemessen werden (geringe Lichtreflexion, Fremdstoffauflagerungen), doch zeigt das Verhältnis der Glanzgrade nach Bearbeitung mit dem Strahlmedium 1 (38%), nach Anwendung des Medium 2 (44,8%) und der Kombination beider (45,6%) im Vergleich mit den anderen Legierungen ähnliche Tendenzen, so dass auf den gleichen Bearbeitungseffekt geschlossen werden kann. Bei beiden Legierungen und dem Titan zeigt die Bearbeitung mit den Strahlkugeln einen besonders positiven Effekt. Dies wird deutlich durch einen sprunghaften Anstieg der Glanzgrade von der Bearbeitung mit dem abrasiven Strahlmittel zu den Werten nach Anwendung der Strahlkugeln (siehe Diagramm 22-24). Im Gegensatz dazu liegen die ermittelten Glanzgrade nach Bearbeitung mit den Strahlkugeln und die nach Kombination beider Strahlmedien in ähnlichen Bereichen: bei Degudent H ist eine Veränderung von 44,8% auf 45,6% zu verzeichnen, Remanium GM380 zeigt einen minimalen Anstieg von 51% auf 59% und bei Titan konnte ein leichter Abfall von 54,9% auf 52,1% festgestellt werden.

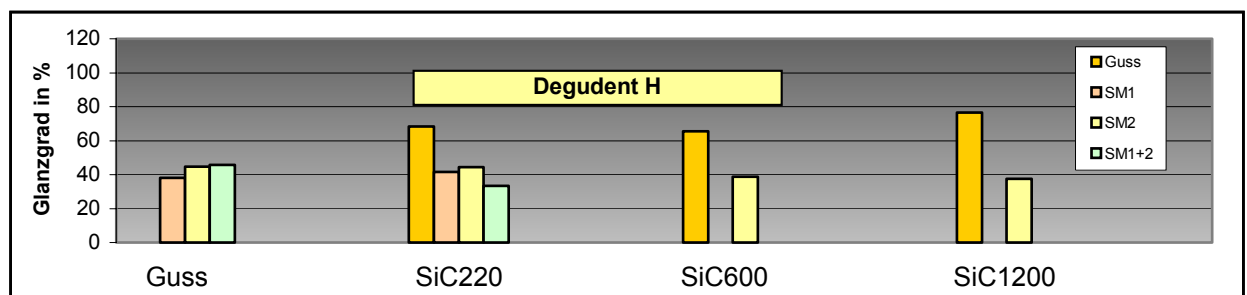


Abb. 22: Glanzgrad von Degudent H im gegossenen und vorgeschliffenen Zustand vor und nach Micro-Finishing

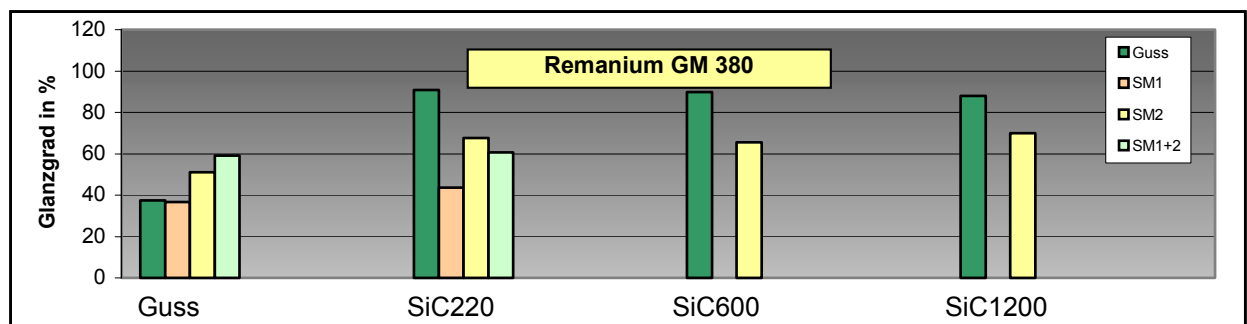


Abb. 23: Glanzgrad von Remanium GM380 im gegossenen und vorgeschliffenen Zustand vor und nach Micro-Finishing

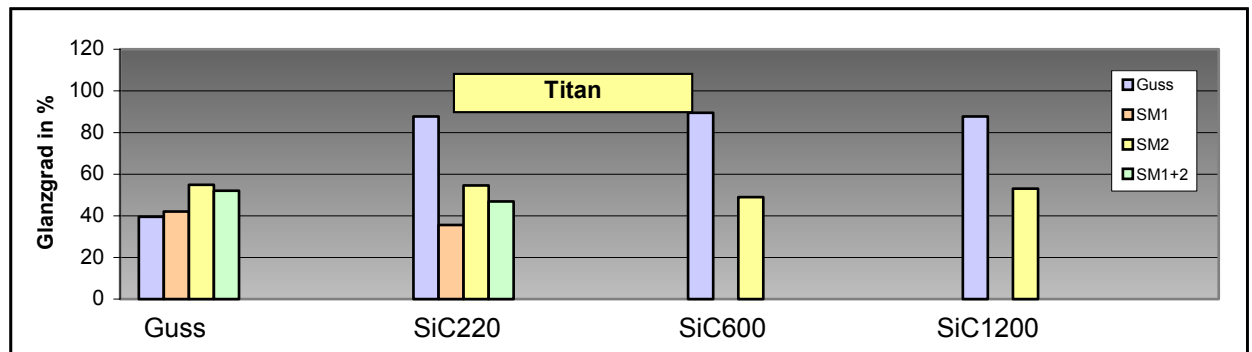


Abb. 24: Glanzgrad von Titan im gegossenen und vorgeschliffenen Zustand vor und nach Micro-Finishing

Werden die untersuchten Metalle im vorgeschliffenen Zustand bearbeitet, so ist mit einer Verschlechterung des Glanzgrades zu rechnen. Dabei bewirkt das abrasive Strahlmittel 1 eine Aufrauung der Oberfläche, die zu einer größeren Streuung des Lichtes verbunden mit einem verringerten Glanzgrad führt. Deutlich wird dies durch einen Abfall der Glanzgrade im Ausgangszustand (Vorschleiff mit Korundpapier der Körnung 220) gegenüber der Bearbeitung mit dem Strahlmittel 1 auf nahezu die Hälfte: hierbei fallen die Werte bei der Goldlegierung von 68,2% auf 41,6%, bei der Kobaltbasislegierung von 90,8% auf 43,6% und bei Titan von 87,6% auf 35,6%. Auch die alleinige Anwendung der Strahlkugeln auf den vorgeschliffenen Zustand bewirkt eine Verschlechterung des Glanzvermögens. Dies zeigt sich bei allen drei mit Schleifpapier der Körnung 600 als auch 1200 vorgeschliffenen Werkstoffen. Bei der hochgoldhaltigen Legierung verringert sich der Glanzgrad bei beiden Ausgangszuständen gegenüber der Bearbeitung mit den Strahlkugeln auf etwa die Hälfte (Abfall um den Faktor 1,7 bei SiC600 und Faktor 2,0 bei SiC1200), während der Unterschied bei der Kobaltbasislegierung geringer ausfällt, aber dennoch deutlich ist (Abfall des Glanzgrades bei SiC600 um den Faktor 1,3, bei SiC1200 um den Faktor 1,2). Ebenfalls bei der Bearbeitung des Titans verringert sich der Glanzgrad auf beinahe die Hälfte des Ausgangszustandes (Verringerung um den Faktor 1,8 bei SiC600 und den Faktor 1,6 bei SiC1200).

#### 5.1.1.3. Mikrohärte

Die Mikrohärte wurde an Querschliffen der Prüfkörper untersucht, um gegebenenfalls einen oberflächenaufhärtenden Effekt durch die Bearbeitung feststellen zu können.

Die Messungen wurden in regelmäßigen Abständen von der Oberfläche (Kap. 4.4.1.2) und in der Prüfkörpermitte durchgeführt (Tabelle B [im Anhang] und Abbildungen 25-32). Die Mikrohärte wurde nur an den gegossenen Prüfkörpern und deren Bearbeitung gemessen, da im Ergebnis der profilographischen Untersuchung kein positiver Effekt des Micro-Finishing auf die vorgeschliffene Oberfläche zu erkennen war. Die statistische Auswertung der Messergebnisse erfolgte als Tiefen- und Methodenvergleich. Beim Tiefenvergleich wurden die Messwerte in 10µm, 20µm, 50µm Tiefe und in der Mitte eines Prüfkörpers untereinander statistisch verglichen (Tab. 7-10). Beim Methodenvergleich erfolgte die statistische Untersuchung an den unterschiedlich bearbeiteten Zuständen eines Werkstoffs in jeweils 10µm Tiefe (Abb. 26, 28, 30, 32, 34).

Bei der **hochgoldhaltigen Legierung** (Abb. 25) liegen die Messwerte im Gusszustand weitgehend im gleichen Bereich und entsprechen etwa den in der Literatur angegebenen Werten (MHV 200-220). Es konnte lediglich ein signifikanter Unterschied (Tab. 7) zwischen der Härte in 10µm (MHV200) und 20µm (MHV184) Abstand von der Oberfläche ermittelt werden. In tieferen Bereichen konnten keine statistisch gesicherten Härteänderungen festgestellt werden. Die Mikrohärtigkeit nach dem separaten Bearbeiten mit dem abrasiven- und Kugelstrahlmedium liegen an Prüfkörperoberfläche und Prüfkörpermitte im gleichen Bereich, was statistisch gesichert werden konnte. Der Zustand nach kombinierter Anwendung beider Strahlmedien auf den Gusszustand zeigte – ähnlich dem Gusszustand – einen signifikanten Unterschied der Mikrohärtigkeit in 20µm (MHV182) zu 10µm (MHV196) Tiefe. In tieferen Bereichen war auch hier kein statistisch gesicherter Unterschied feststellbar. Bei dem Methodenvergleich durch Vergleich der Messwerte in 10µm Tiefe konnten keine Signifikanzen ermittelt werden. Daraus folgt, dass durch die Bearbeitung der hochgoldhaltigen Legierung mit dem Micro-Finishing kein oberflächenaufhärtender Effekt erzielt wird.

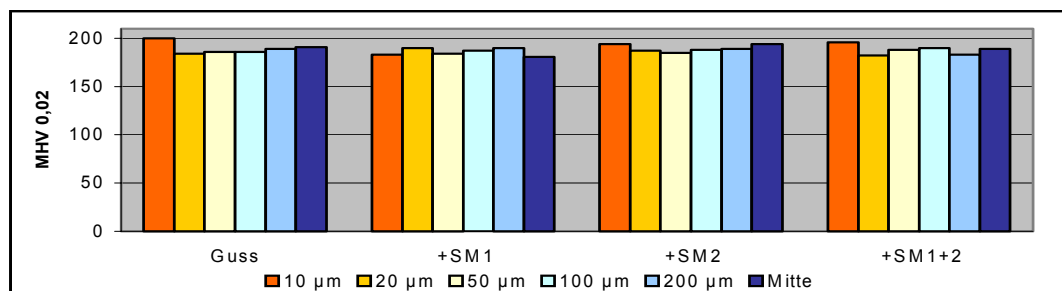


Abb. 25: Ergebnisse der Mikrohärtmessungen (MHV 0,02) in unterschiedlichen Tiefen von Gussproben aus Degudent H vor und nach Micro-Finishing

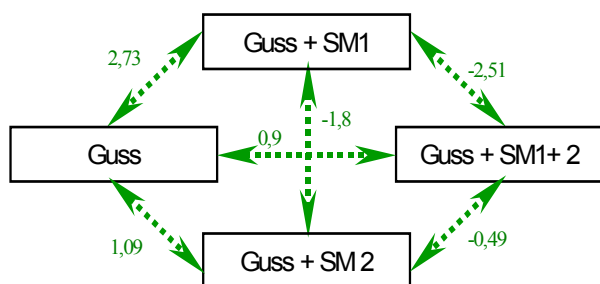


Abb. 26: Statistische Auswertung (t-Test) der Mikrohärtmessungen der Degudent H-Gussproben vor und nach Micro-Finishing (Methodenvergleich)  
 $t_{\text{tab}}=2,88$ , zweiseitige Fragestellung, Irrtumswahrscheinlichkeit 1%, FG=18  
 grün= nicht signifikant

Tab. 7: Statistische Auswertung(t-Test) der Mikrohärtmessungen der Degudent H-Gussproben vor und nach Micro-Finishing (Tiefenvergleich)

Degudent H statistischer Tiefenvergleich	Guss	+SM1	+SM2	+SM1+2
10µm - 20µm	<b>2,91</b>	-1,27	1,18	<b>3,18</b>
20µm - 50µm	-0,43	1,45	0,47	-1,39
50µm - Mitte	-1,87	0,63	-2,37	-0,39
10µm - Mitte	1,79	0,33	0,04	1,96

Irrtumswahrscheinlichkeit 1%, zweiseitige Fragestellung, FG=18,  $t_{\text{tab}}=2,88$

rot=signifikant grün=nicht signifikant

Die Untersuchung der **Kobaltbasislegierung** im Gusszustand zeigte eine durchgängig gleichmäßige Härte, die leicht über den Literaturangaben (MHV 420) liegt und statistisch gesichert war (Abb. 27, Tab. 8). Nach Bearbeitung mit dem abrasiven Strahlmittel stellte sich eine geringfügige, aber signifikante Aufhärtung in den obersten Schichten dar: 20µm:

MHV=507 und 10µm: MHV=558. Eine deutliche Aufhärtung war bei dem mit beiden Strahlmedien bearbeiteten Zustand zu erkennen: während die Mikrohärtigkeit in der Prüfkörpermitte bei MHV=509 lag, stieg sie in 20µm auf MHV=616 und 10µm Tiefe auf MHV=715 an. Diese Unterschiede bestätigt auch die statistische Auswertung mit dem errechneten t-Wert von 6,49 im Vergleich zum tabellarischen Wert von  $t=2,88$ . Bei der statistischen Untersuchung der Bearbeitungszustände untereinander in 10µm Tiefe zeigte sich keine Signifikanz vom Gusszustand zu der Bearbeitung mit dem Strahlmittel 1. Dies relativiert den an sich statistisch gesicherten Unterschied innerhalb des mit SM 1 bearbeiteten Zustandes zwischen den Messwerten in 10µm und 20µm Tiefe. Deutlich jedoch ist der Unterschied vom abrasiven zum kombinierten Strahlen (errechneter t-Wert = -5.59) und vom Gusszustand zum kombinierten Strahlen (errechneter t-Wert = -10,1; Abb. 28). Aus diesen Ergebnissen kann ein deutlich aufhärtender Effekt des Micro-Finishing auf die Oberfläche der Kobaltbasislegierung abgeleitet werden.

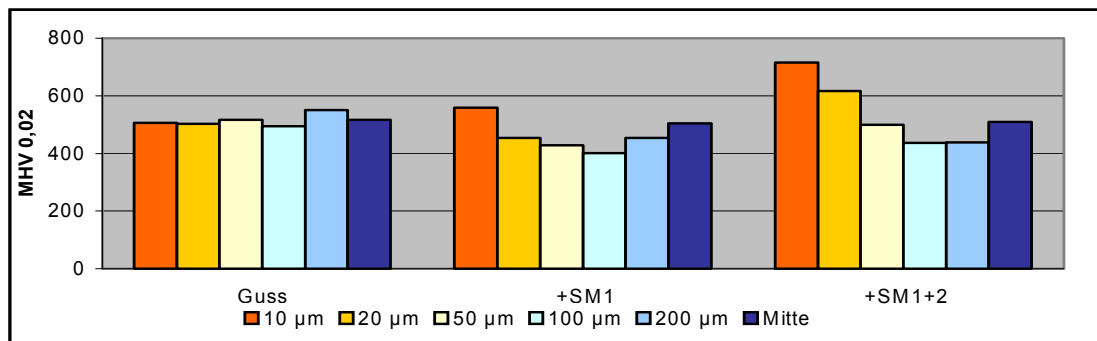


Abb. 27: Ergebnisse der Mikrohärtmessungen (MHV 0,02) in unterschiedlichen Tiefen von Gussproben aus Remanium GM380 vor und nach Micro-Finishing

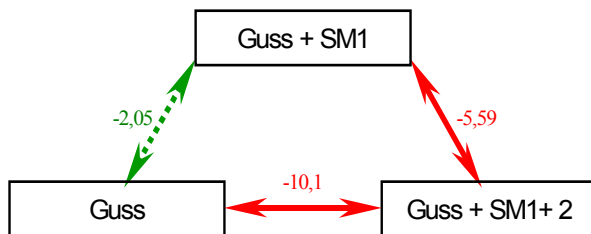


Abb. 28: Statistische Auswertung (t-Test) der Mikrohärtmessungen der Remanium GM380-Gussproben vor und nach Micro-Finishing (Methodenvergleich)  
 $t_{\text{tab}}=2,88$ , zweiseitige Fragestellung,  $FG=18$   
 Irrtumswahrscheinlichkeit 1%,  
 rot=signifikant; grün=nicht signifikant

Tab. 8: Statistische Auswertung (t-Test) der Mikrohärtmessungen der Remanium GM380-Gussproben vor und nach Micro-Finishing (Tiefenvergleich)

Remanium GM380				
statistischer Tiefenvergleich	Guss	+SM1	+SM2	+SM1+2
10µm - 20µm	0,34	3,71		3,54
20µm - 50µm	-0,84	1,05		3,85
50µm - Mitte	-0,06	-2,74		-0,26
10µm - Mitte	-0,61	1,67		6,49

Irrtumswahrscheinlichkeit 1%, zweiseitige Fragestellung,  $FG=18$ ,  $t_{\text{tab}}=2,88$

rot=signifikant grün=nicht signifikant

Die Messwerte der Mikrohärtigkeit an den Querschliffen der Gussproben aus Titan liegen bei der Bearbeitung des gegossenen Zustandes in 10µm, 20µm und 50µm Tiefe deutlich über dem in der Literatur angegebenen Wert von 180 bis 250 Grad nach Vickers (Tab. B (Anhang), Abb. 29). Diese Erhöhung ist auf die durch den Guss hervorgerufene oberflächliche Reaktionszone ( $\alpha$ -case) zurückzuführen, die durch eine hohe Streuung der Messwerte gekennzeichnet ist. Nachweisbar sind diese erhöhten Härtewerte am Gusszustand und dessen Bearbeitung durch Micro-Finishing und reichen bis in eine Tiefe von 50µm. Die

deutliche Reduktion der Mikrohärtigkeit zeigt vor allem den abrasiven Charakter des Strahlmittel I, wodurch es zu einem Abtrag der  $\alpha$ -case und folglich einer Härteabnahme kommt (Abb.29).

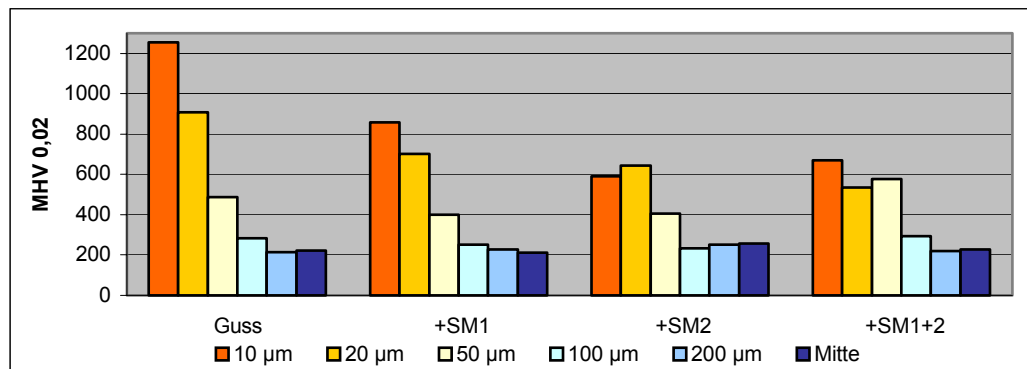


Abb. 29: Ergebnisse der Mikrohärtmessungen (MHV 0,02) in unterschiedlichen Tiefen von Gussproben aus Titan vor und nach Micro-Finishing

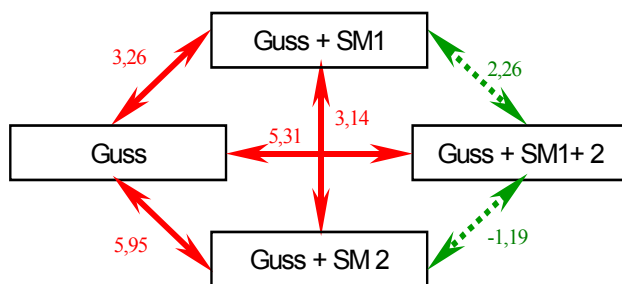


Abb. 30: Statistische Auswertung (t-Test) der Mikrohärtmessungen der Titan-Gussproben vor und nach Micro-Finishing (Methodenvergleich)  
 $t_{\text{tab}}=2,88$ , zweiseitige Fragestellung, FG=18  
 Irrtumswahrscheinlichkeit 1%,  
 rot=signifikant; grün=nicht signifikant

Tab. 9: Statistische Auswertung (t-Test) der Mikrohärtmessungen der Titan- Gussproben vor und nach Micro-Finishing (Tiefenvergleich)

Titan statistischer Tiefenvergleich	Guss	+SM1	+SM2	+SM1+2
10µm - 20µm	2,83	1,62	-0,59	2,07
20µm - 50µm	5,92	4,39	3,14	-0,77
50µm - Mitte	12,58	13,5	5,97	11,67
10µm - Mitte	10,35	8,76	6,69	9,56

Irrtumswahrscheinlichkeit 1%, zweiseitige Fragestellung, FG=18,  $t_{\text{tab}}=2,88$

rot=signifikant grün=nicht signifikant

Da an dieser durch den Guss hervorgerufenen Reaktionszone kein oberflächenaufhärtender Effekt nachgewiesen werden kann, wurden Mikrohärtmessungen am Titan ebenfalls an vorgeschliffenen Prüfkörpern und nach deren Strahlbehandlung durchgeführt (Abb. 31). Die Messwerte der Ausgangszustände im vorgeschliffenen Zustand (SiC220, SiC600, SiC1200) sind an Prüfkörperoberfläche und Prüfkörpermitte weitestgehend gleich und entsprechen den Literaturangaben. Es kann daher von einer vollständigen Entfernung der oberflächlichen Reaktionsschicht ausgegangen werden. Durch die Bearbeitung mit dem abrasiven Strahlmittel (bei SiC220) kann eine gewisse Aufhärtung der Oberfläche festgestellt werden, die statistisch gesichert ist (im Ausgangszustand: MHV(20µm)=239; nach SM1: MHV(20µm)=294) (Tab. 10). Eine deutliche Aufhärtung der Oberfläche erfolgt nach der Bearbeitung mit dem Kugelstrahlen beziehungsweise nach kombinierter Anwendung von SM1 und SM2. Diese ist besonders signifikant in 10µm Tiefe: nach abrasiver Bearbeitung liegt die Mikrohärtigkeit bei MHV=288 und steigt durch zusätzliches Kugelstrahlen auf MHV=482 (Tab. 10). Durch alleiniges Kugelstrahlen kann in 10µm Tiefe bereits ein Härtewert von MHV=376 erzielt werden. Nach vorhergehender Entfernung der oberflächlichen Reaktionszone kann demzufolge durch das Kugel- oder kombinierte Strahlen mit SM1 und 2 eine Aufhärtung der Oberfläche erzielt werden (Abb. 32).

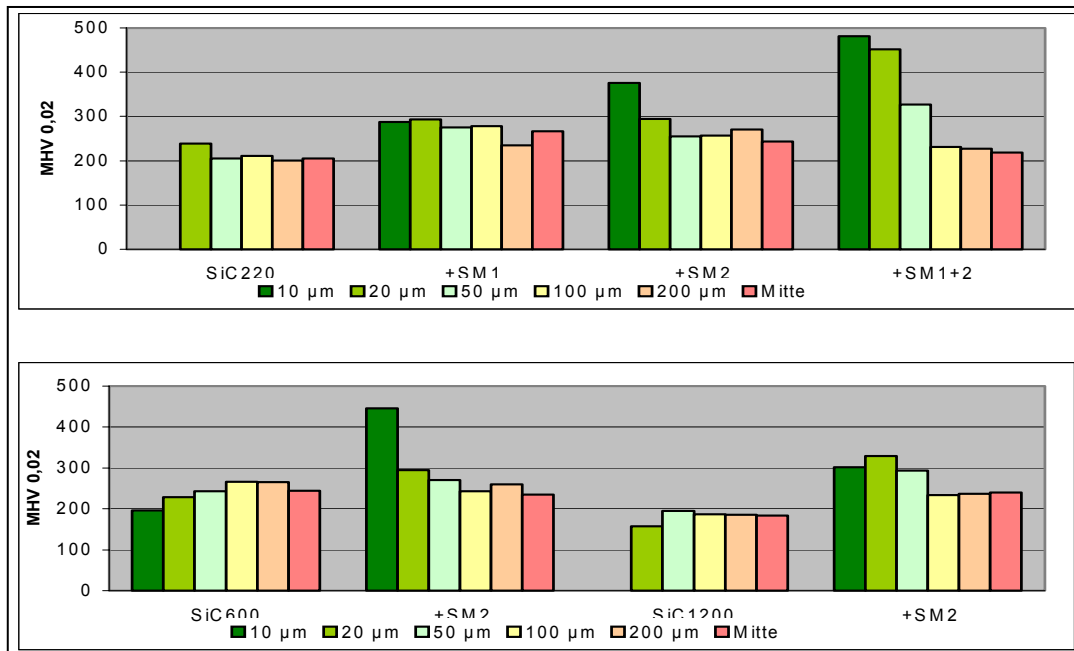


Abb. 31: Ergebnisse der Mikrohärteprüfungen (MHV 0,02) in unterschiedlichen Tiefen von feingeschliffenen Gussproben (220er, 600er und 1200er Nassschliff) aus Titan vor und nach Micro-Finishing

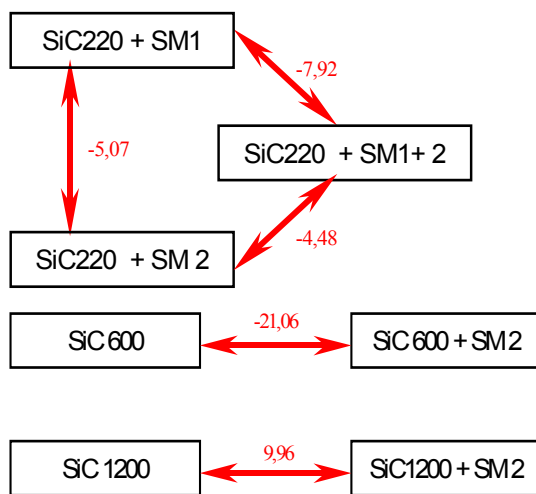


Abb. 32: Statistische Auswertung (t-Test) der Mikrohärtemessungen der mit 220er, 600er und 1200er Nassschliff vorgeschliffenen Titan-Gussproben vor und nach Micro-Finishing (*Methodenvergleich*)  
 $t_{\text{tab}}=2,88$ , zweiseitige Fragestellung, Irrtumswahrscheinlichkeit 1%, FG=18.  
 Bei SiC1200 erfolgte der Vergleich in 20µm Tiefe, da die Mikrohärte in 10µm Tiefe nicht messbar war.  
 rot=signifikant

Tab.10: Statistische Auswertung (t-Test) der Mikrohärtemessungen der mit 220er, 600er und 1200er Nassschliff vorgeschliffenen Titan- Gussproben vor und nach Micro-Finishing (*Tiefenvergleich*)

Titan	SiC220	+SM1	+SM2	+SM1+2
statistischer Tiefenvergleich				
10µm - 20µm		-0,41	4,73	1,18
20µm - 50µm	3,17	0,83	2,56	9,01
50µm - Mitte	0	0,35	1,09	14,29
10µm - Mitte	2,76	1,35	10,47	11,69
	SiC600	+SM2	SiC1200	+SM2
10µm - 20µm	-2,89	9,43		-1,31
20µm - 50µm	-1,21	1,82	-3,47	2,29
50µm - Mitte	-0,15	4,06	1,21	3,75
10µm - Mitte	-5,81	17,62	-2,37	3,14

Irrtumswahrscheinlichkeit 1%, zweiseitige Fragestellung, FG=18,  $t_{\text{tab}}=2,88$

rot=signifikant grün=nicht signifikant

### 5.1.2. *Bildgebende Verfahren*

#### 5.1.2.1. Lichtmikroskopische Untersuchungen

Die lichtmikroskopische Untersuchung mittels Auflichtmikroskopie erfolgte, um eine erste Übersicht über die vorliegenden Oberflächen zu erhalten. Detaillierte Aussagen über Oberflächenstrukturen können nicht getroffen werden (dazu dient die Darstellung im Rasterelektronenmikroskop, siehe Kapitel 5.1.2.2.); zur allgemeinen Einschätzung der Oberflächeneffekte sind die lichtmikroskopischen Aufnahmen jedoch geeignet. Sie sollen daher hier kurz besprochen werden.

Untersucht wurden die Oberflächen im Gusszustand sowie im vorgeschliffenen Zustand (SiC220) und nach deren Bearbeitung. Es wurden Mikrofotografien in ursprünglich 200facher Vergrößerung angefertigt (Abbildungsmaßstäbe sind eingezeichnet).

Die Oberflächencharakteristik zeigt kaum Unterschiede zwischen den Legierungen im jeweiligen Bearbeitungszustand. Ebenfalls sind die Aufnahmen nach Bearbeitung des Gusszustandes und nach Bearbeitung der vorgeschliffenen Oberfläche sehr ähnlich. Daher sollen der Gusszustand des Degudent H einzeln und die Gusszustände von Remanium GM380 und Titan gemeinsam dargestellt werden.

Die **Goldlegierung** Degudent H zeigt im Gusszustand eine grobe und unebene Oberfläche (Abb. 33). Die Unebenheiten ragen teilweise aus dem Bereich der Schärfentiefe heraus. Die Bearbeitung mit dem Strahlmedium 1 bewirkt eine gleichmäßig strukturierte, relativ feinkörnige Oberfläche (Abb. 34). Die alleinige Verwendung des Kugelstrahlmediums führt bei der Goldlegierung zu deutlichen sphärischen Eindrücken der Strahlkugeln (Abb. 35). Bei Verwendung beider Strahlmittel sind die kugelförmigen Einschlüsse immer noch erkennbar, aber durch die abrasive Vorbehandlung nicht so ausgeprägt wie bei alleiniger Anwendung von Strahlmedium 2 (Abb. 36). Die Aufnahmen von der vorgeschliffenen und gestrahlten Oberfläche zeigen die gleichen Charakteristika, nur in etwas geringerem Maße.

Bei der Betrachtung der **Kobaltbasislegierung** im Gusszustand fällt ebenfalls eine grob strukturierte und unebene Oberfläche auf, die noch aufgeworfener erscheint als die des **Titans** im Gusszustand. Bei beiden ist die Oberfläche nach Anwendung des Strahlmittel 1 wesentlich feinkörniger und gleichmäßiger (vergleichbar mit der Bearbeitung des Degudent H, siehe Abb. 34). Die alleinige Anwendung des Strahlmittel 2 erzeugt kugelförmige Einschlüsse, die aber nicht so ausgeprägt sind, wie bei der hochgoldhaltigen Legierung (Abb. 37). Es sind rundliche Strukturen zu erkennen, die eine Fläche mit einer gewissen Grundwelligkeit bilden. Bei der Kombination des abrasiven und des Kugelstrahlmittels (Abb. 38) ist ebenfalls der Effekt beider Medien zu erkennen: eine relativ wellige Oberfläche, die in ihrer Struktur durch Einwirkung der Strahlkugeln nicht ganz so feinkörnig erscheint wie nach alleiniger abrasiver Bearbeitung. Bei der Betrachtung der Oberflächen im vorgeschliffenen Zustand (bei Titan und der Kobaltbasislegierung) ist kein Unterschied zwischen abrasiver Bearbeitung, Anwendung des Strahlmediums 2 und der Kombination beider zu erkennen.



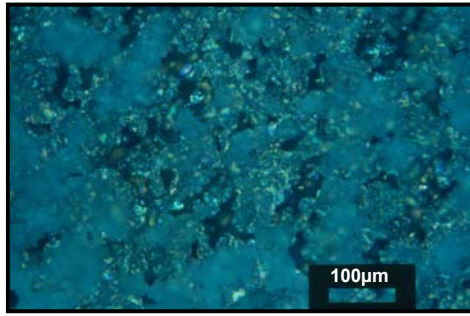


Abb. 33: Degudent H, Gusszustand

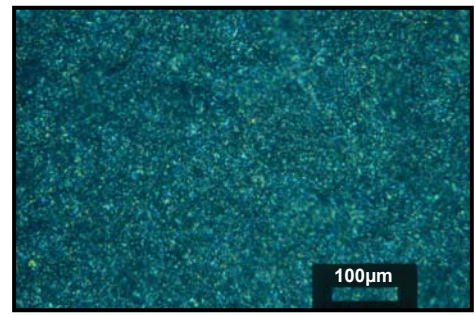


Abb. 34: Degudent H, Guss + SM1

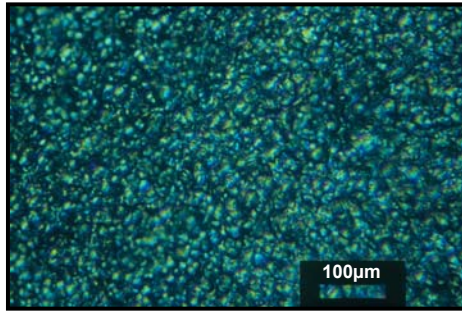


Abb. 35: Degudent H, Guss + SM2

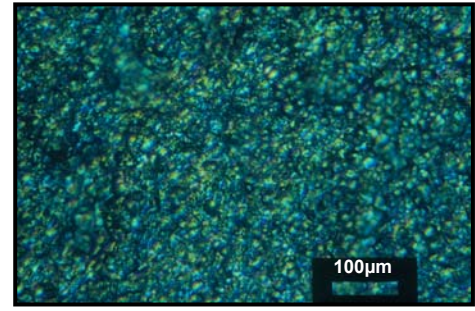


Abb. 36: Degudent H, Guss + SM1+2

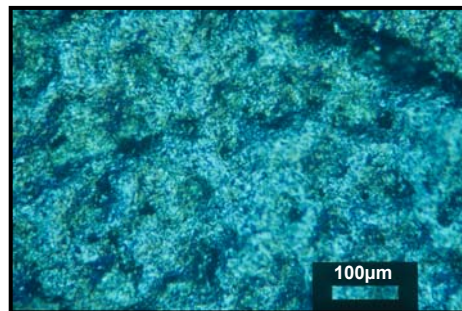


Abb. 37: Remanium, Guss + SM2

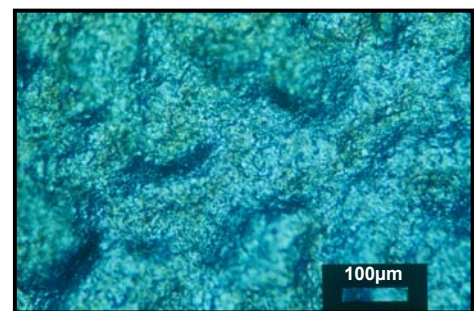


Abb. 38: Remanium, Guss+SM 1+2

#### 5.1.2.2. Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen erlauben eine detaillierte Darstellung der Oberflächenmorphologie. Veränderungen der Oberflächenstruktur und die Auswirkung der Bearbeitungsmethoden können anhand der Rasterelektronenmikroskopie gut beschrieben und analysiert werden.

Die untersuchten Materialien wurden unter standardisierten Bedingungen im REM betrachtet und es wurden Aufnahmen in primär 600-, 1200- und 2400facher Vergrößerung, vereinzelt auch zusätzliche Aufnahmen in anderen Abbildungsmaßstäben, angefertigt. Die Untersuchungen erfolgten zunächst am Gusszustand und nach dessen Strahlbehandlung, wurden aber teilweise auch am vorgeschliffenen Ausgangszustand und dessen Bearbeitung durchgeführt.

Da die profilographischen Untersuchungen der **hochgoldhaltigen Legierung** keinen günstigen Einfluss des Micro-Finishing auf die vorgeschliffene Oberfläche zeigten, wurde nur der Gusszustand und dessen Bearbeitung im Rasterelektronenmikroskop untersucht.

Die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Degudent H im Gusszustand zeigt eine gleichmäßig unebene Oberfläche deren Grundstruktur abgerundet erscheint (Abb. 39). Scharfkantige Strukturen sind nicht zu erkennen, wobei oberflächlich die plaqueartigen,



aufgesinterten Rückstände der Einbettmasse imponieren (Abb. 40). Diese wurden mittels Mikrosonde analysiert, wobei unter anderen die Elemente Magnesium, Aluminium und Silizium nachgewiesen werden konnten und somit eindeutig ein Zusammenhang mit der Einbettmasse hergestellt werden kann. Deutlich sind Gussporositäten ersichtlich, welche die Oberfläche zerklüftet erscheinen lassen (Abb. 39). Die Anwendung des abrasiven Strahlmittels 1 bewirkt eine ebenfalls gleichmäßig strukturierte, jedoch scharfkantige Oberfläche. Deutlich sind lange Schnittpuren des Strahlmittels 1 zu erkennen. Gussporositäten und Einbettmasserückstände sind nicht mehr zu sehen (Abb. 41). Die alleinige Anwendung des Kugelstrahlmediums erzielt eine sehr ebene, glatte Oberfläche. Die Profilerhebungen scheinen plattgedrückt beziehungsweise umgeklappt zu sein. Insgesamt ergibt sich der Eindruck einer geschmiedeten Fläche. Vereinzelt sind noch Eingänge der Gussporositäten zu sehen (Abb. 42). Die Oberfläche nach Anwendung beider Strahlmittel zeigt eine ähnliche Morphologie wie nach alleiniger Anwendung des Kugelstrahlmittels. Jedoch erscheinen die geschmiedeten Flächen großflächiger, es sind keine Eingänge der Gussporositäten zu sehen. Vereinzelt sind restliche Schnittpuren des abrasiven Strahlmittels zu erkennen (Abb. 43).

Als Übersichtsaufnahme wurde der Gusszustand der **Kobaltbasislegierung** zusätzlich in 70facher Vergrößerung eingefügt (Abb. 44). Erkennbar ist eine ungleichmäßig strukturierte Oberfläche, auf der sich vereinzelt große schildartige Platten mit glatter Oberfläche befinden. Die stärkere Vergrößerung (Abb. 45; 550fach) zeigt eine grobe Zerklüftung, die recht tief reicht und deren Ränder sehr scharfkantig erscheinen. Nach Bearbeitung mit dem Strahlmedium 1 imponieren wiederum die Schnittpuren des abrasiven Strahlkornes, die sehr scharfkantig und im Vergleich zu der Wirkung auf die Goldlegierung wesentlich kürzer erscheinen. In 1150fachen Vergrößerung (Abb. 46) ist deutlich der abtragende Effekt des Strahlmedium 1 zu erkennen; es sind flächige Schneidspuren wie nach Abschürfung einer oberflächlichen Struktur vorhanden. Da die alleinige Anwendung des Strahlmittel 2 in der Profilanalyse einen nur sehr geringen Unterschied zu der abrasiven Bearbeitung zeigte, wurde dieser Zustand nicht im REM untersucht. Die Kombination von Strahlmedium 1 und 2 bewirkt eine nicht homogene, aber weitestgehend glatte Oberfläche. Die Profilerhebungen scheinen auch hier umgeklappt beziehungsweise geschmiedet zu sein. Vereinzelt sind Einschläge der Strahlkugeln und Reste der abrasiven Schneidspuren zu erkennen (Abb. 47). Die Oberflächenmorphologie der mit SiC220-Papier vorgeschliffenen Oberfläche nach der Bearbeitung mit dem Micro-Finishing zeigt kaum Unterschiede zu der Bearbeitung des gegossenen Zustandes.

Der Gusszustand des **Titan** zeigt in der Übersicht (Abb. 48, 280fach) eine von der Grundstruktur relativ glatte Oberfläche. Auf dieser befinden sich zahlreiche grob strukturierte

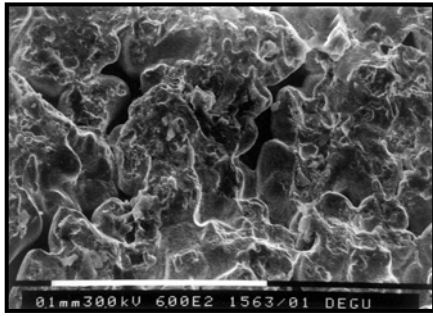


Abb. 39: Degudent H, Guss, REM

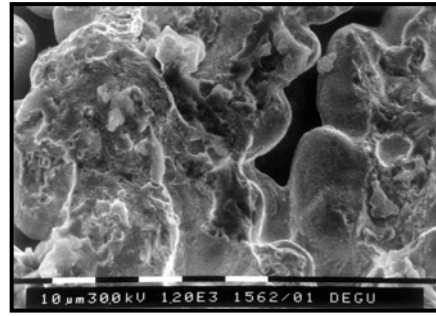


Abb. 40: Degudent H, Guss, REM

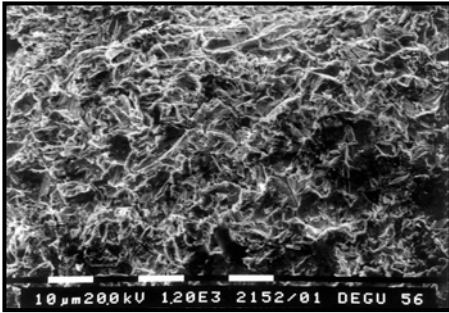


Abb. 41: Degudent H, Guss + SM1, REM

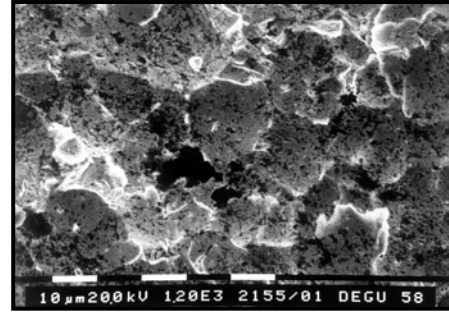


Abb. 42: Degudent H, Guss + SM 2, REM

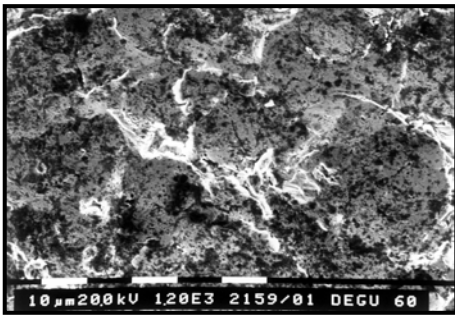


Abb. 43: Degudent H, Guss + SM 1+2, REM

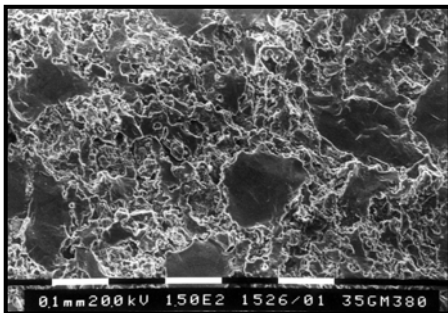


Abb. 44: Remanium GM 380, Guss, REM

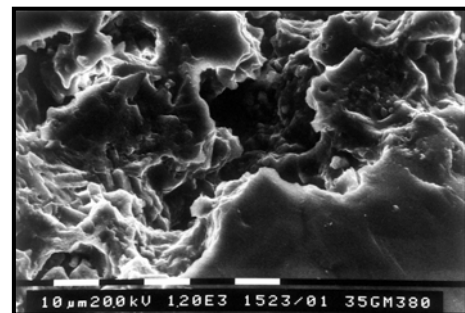


Abb. 45: Remanium GM380, Guss, REM

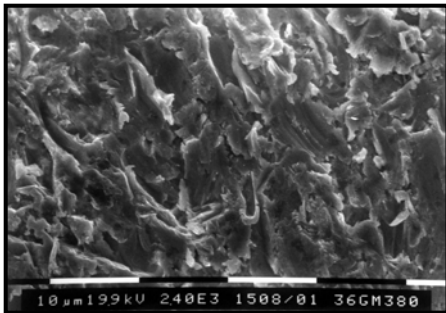


Abb. 46: Remanium GM380, Guss + SM1, REM

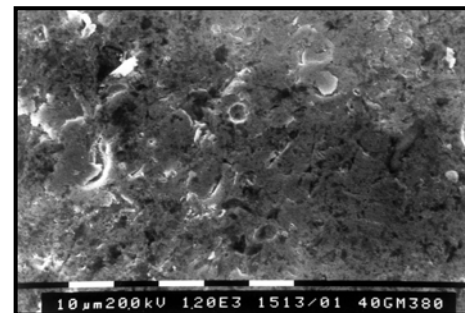


Abb. 47: Remanium GM380, Guss + SM 1+2

Auflagerungen, die als Rückstände der Einbettmasse erklärt werden können. Eine mikroanalytische Untersuchung ergab die elementare Zusammensetzung aus Aluminium (ca.3,8-4,5%), Silizium (ca.0,7-5%), Zirkonium (ca.0,8-2,7%) und Magnesium (<1%). Somit handelt es sich um die in der Literatur als "Gusshaut" bezeichnete Struktur. In der stärkeren Vergrößerung (Abb. 49) sind ebenfalls Gussporositäten und im Detail die aufgesinterten Einbettmasserückstände zu sehen. Die Grundstruktur der Oberfläche erscheint auch hier relativ eben beziehungsweise leicht gewellt.

Nach dem abrasiven Strahlen zeigt sich das Bild einer gleichmäßig strukturierten Oberfläche mit Schnittspuren des Strahlkornes (Abb. 50). Diese erscheinen im Vergleich zu den anderen Legierungen weniger deutlich gezeichnet und verwaschen. Jedoch ist auch hier der abrasive Charakter und der Abtrag oberflächlicher Schichten zu erkennen. Bei alleiniger Anwendung des Kugelstrahlmediums (Abb. 51) ergibt sich wie bei den anderen untersuchten Materialien eine weitestgehend geglättete, geschmiedete Oberfläche. Vereinzelt sind noch Furchen beziehungsweise durch das Umschmieden der Profilerhebungen nicht überdeckte Reste der Gussoberfläche zu sehen. Ebenfalls ersichtlich sind Rückstände impaktierter Strahlkugeln.

Durch die Bearbeitung mit beiden Strahlmedien (Abb. 52) kann ebenfalls eine relativ glatte Oberfläche erzielt werden, bei der noch kleinflächige Spuren des abrasiven Strahlens zu sehen sind. Diese Stellen scheinen vom Kugelstrahlmedium nicht vollständig zugeschmiedet zu sein. Vereinzelt sind auch hier deutliche Einschläge der Strahlkugeln zu sehen.

Die Betrachtung der vorgeschliffenen Oberfläche (Abb. 53) zeigt die deutlichen Schneidspuren des Siliziumkarbidpapiers (SiC220), welche die Oberfläche quasi durchpflügen. Nach Anwendung des abrasiven Strahlens (Abb. 54) ist wieder das Bild einer gleichmäßig strukturierten Oberfläche mit ungerichteten Schneidspuren der Strahlkörner zu sehen. Die Schnitte sind im Vergleich zu der Bearbeitung des Gusszustandes weniger deutlich beziehungsweise flacher. Spuren des vorherigen Nassschliffes sind nicht zu erkennen. Die Anwendung des Kugelstrahlens auf die vorgeschliffene Oberfläche ergibt das gleiche Bild wie nach entsprechender Bearbeitung des Gusszustandes (Abb. 55): eine weitestgehend glatte Oberfläche mit vereinzelt Rückständen des Strahlmittels und Spuren des vorhergehenden Bearbeitungszustandes.

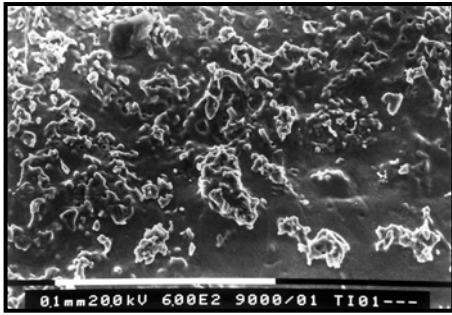


Abb. 48: Titan, Guss, REM

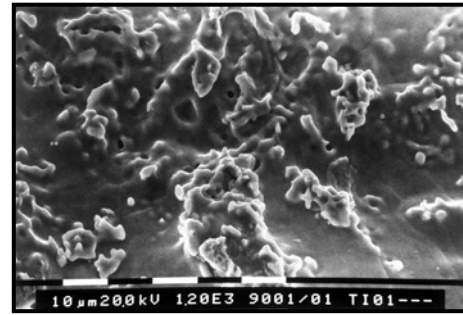


Abb. 49: Titan, Guss, REM

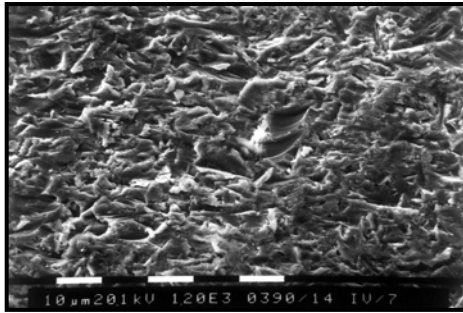


Abb. 50: Titan, Guss + SM1, REM

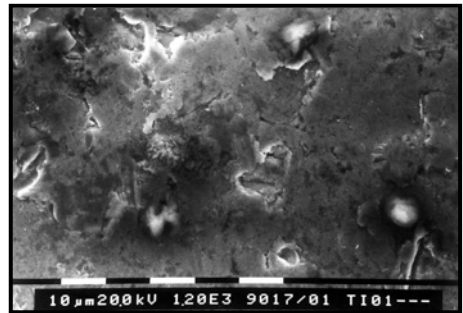


Abb. 51: Titan, Guss + SM2, REM

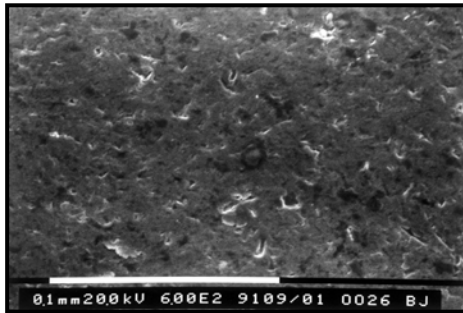


Abb. 52: Titan, Guss + SM1+2, REM

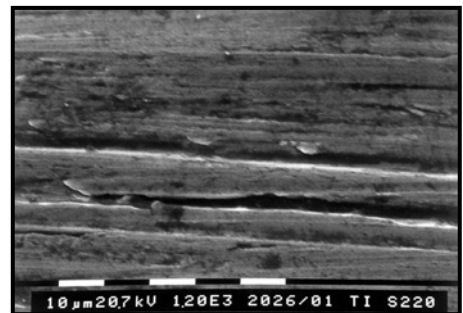


Abb. 53: Titan, SiC 220, REM

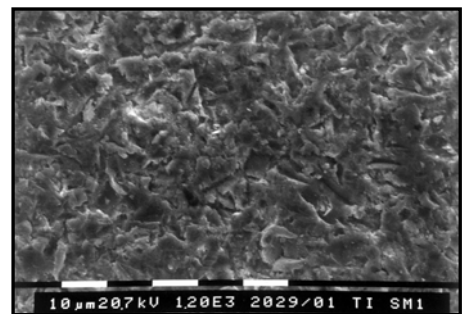


Abb. 54: Titan, SiC220 + SM1, REM

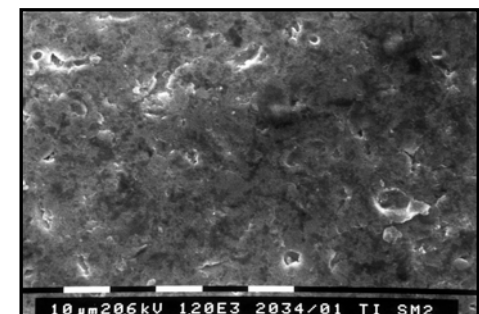


Abb. 55: Titan, SiC220 + SM2, REM

### 5.1.2.3. Metallographie

Bei der metallographischen Untersuchung wurden Querschliffe ausgesuchter Prüfkörper angefertigt, um eventuell die oberflächliche Gefügestruktur verändernde Einflüsse des Micro-Finishing feststellen zu können. Die Querschliffe des Degudent H und Remanium GM380 wurden im polierten Zustand betrachtet. Bei den Querschliffen des Titan kam zusätzlich eine spezielle Farbätzung zur Anwendung (siehe Kap. 4.4.2.3.). Die Aufnahmen der Goldlegierung und der Kobaltbasislegierung sind in 225facher Vergrößerung wiedergegeben. Die Querschliffe des Titans im gegossenen Zustand werden in 225facher, die der vorgeschliffenen Oberfläche des Titans in 450facher Vergrößerung dargestellt.

#### Bei der Betrachtung der **hochgoldhaltigen Legierung**

im Gusszustand fällt eine sehr grob strukturierte Oberfläche mit tiefen Einbuchtungen auf, die vereinzelt bis in eine Tiefe von 20µm reichen (Abb. 56). Ebenfalls charakteristisch sind die Gussporositäten innerhalb des Prüfkörpers. An der Oberfläche sind Reste der Einbettmasse (Gusshaut) zu erkennen. Die abrasive Bearbeitung bewirkt eine deutliche oberflächliche Einebnung und Reinigung der Oberfläche von der Gusshaut. Jedoch sind innerhalb der oberflächennahen Schicht Rückstände zu sehen, die als impaktierte Strahlkörner interpretiert werden können. Charakteristisch für diesen Zustand ist somit eine fein zerklüftete Oberfläche mit unregelmäßiger Struktur und impaktierten Strahlmittlrückständen. Die Oberfläche nach alleiniger Bearbeitung mit dem Kugelstrahlmedium erzielt eine wesentlich glattere Oberflächenstruktur. Die hämmernde Wirkung der Strahlkugeln scheint die Profilerhebungen der Gussoberfläche umzuklappen, so dass der Eindruck einer geschmiedeten Oberfläche entsteht. Auch hier sind poröse Strukturen zu erkennen, die aber als zugeschmiedete Furchen der gegossenen Oberfläche erklärt werden können und deutlich seltener vorkommen als die impaktierten Rückstände nach abrasiver Bearbeitung. Wird die Kombination beider Strahlmedien auf die gegossene Oberfläche angewendet, so ist die resultierende Oberflächenstruktur als wesentlich ungünstiger einzuschätzen als nach alleiniger Kugelstrahlbearbeitung (Abb. 56). Die Oberfläche ist unruhiger und weist viele eingeschmiedete Strahlmittlrückstände auf. Sie ist vergleichbar mit der nach abrasiver Bearbeitung entstandenen Struktur.

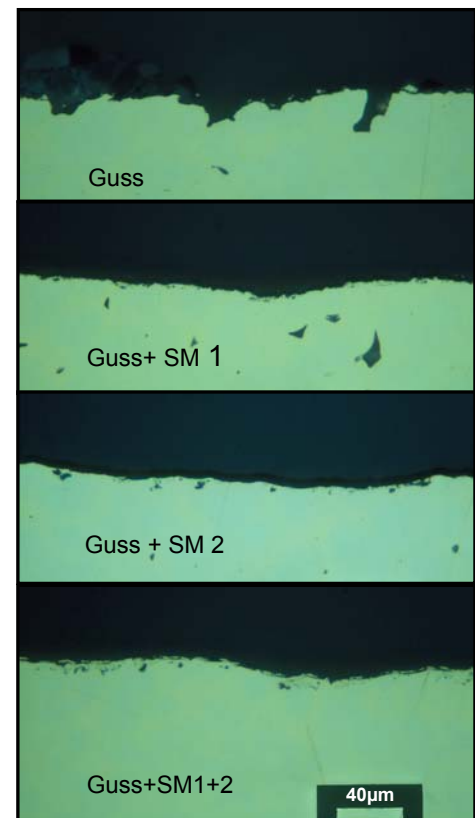


Abb. 56: Gussproben des Degudent H und deren Bearbeitung mit Micro-Finishing, Querschliffe, ungeätzt

Die Gussoberfläche der **Kobaltbasislegierung** zeigt ebenfalls eine sehr grobe Struktur mit starker Zerklüftung, die jedoch regelmäßiger erscheint als die der Goldlegierung (Abb. 57). Rückstände der Einbettmasse sind auch hier zu sehen. Die Bearbeitung mit dem Strahlmedium 1 erzielt eine gereinigte, in geringem Maße zerklüftete und regelmäßige Oberfläche. Impaktierungen von Strahlmittelresten scheinen kaum vorzukommen. Der Effekt der alleinigen Anwendung des Kugelstrahlmittels auf die härtere Kobaltbasislegierung ist weit geringer als bei entsprechender Bearbeitung der hochgoldhaltigen Legierung. Die Oberfläche ist wesentlich unregelmäßiger. Zwar scheinen auch hier die Profilerhebungen umgeklappt zu werden, jedoch reicht dieser Effekt nicht aus, um die gussbedingten Rauigkeiten zuzuschmieden. Die Kombination von Strahlmittel 1 und 2 bewirkt eine gereinigte und sehr gleichmäßige Oberfläche (Abb. 57). Es sind keine Verunreinigungen beziehungsweise Impaktierungen von Resten der Strahlmittel zu erkennen. Somit zeigt diese Bearbeitung den günstigsten Effekt mit einer gereinigten, glatten und homogenen Oberfläche.

Die Auswirkung des Micro-Finishing auf die mit SiC-Papier 220er Körnung vorgeschliffene Oberfläche ist ähnlich. Die durch den Vorschleiff gereinigte und geebnete Oberfläche wird durch das abrasive Strahlen aufgeraut. Durch zusätzliches Kugelstrahlen kann dieser Effekt beseitigt werden und es zeigt sich eine Oberfläche, die der Ausgangssituation gleicht. Die kombinierte Anwendung von Strahlmittel 1 und 2 ist auch hier am günstigsten, obwohl im Vergleich zur Ausgangssituation keine Verbesserung erzielt werden kann.

Die Querschliffe des **Titan** wurden in der Vorbereitung mit dem Ätzverfahren nach Weck behandelt, wodurch sauerstoffangereicherte Regionen weiß und die mikrokristalline Struktur gut dargestellt werden können.

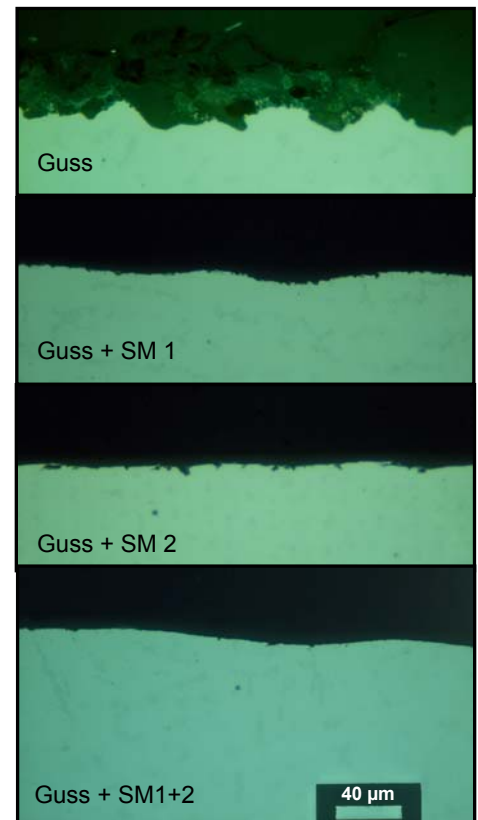


Abb. 57: Gussproben des Rermanium GM380 und deren Bearbeitung mit Micro-Finishing, Querschliffe, ungeätzt

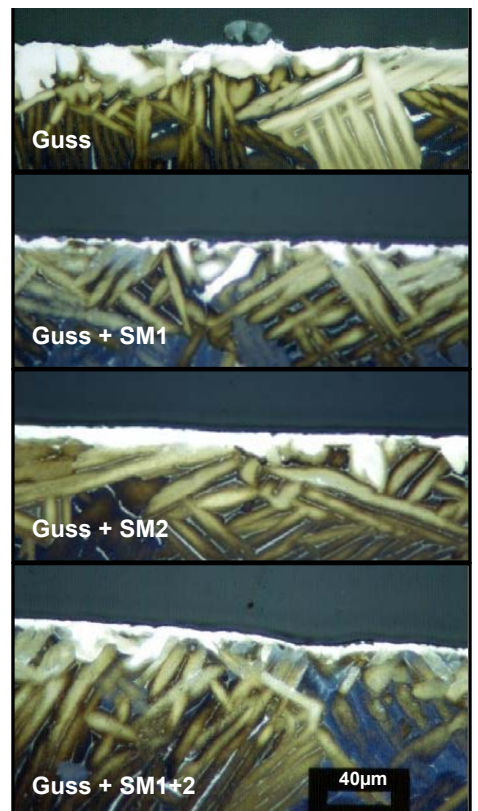


Abb. 58: Gussproben des Biotan und deren Bearbeitung mit Micro-Finishing, Querschliffe, Farbätzung nach Weck



Im Gusszustand ist eine breite, mit Sauerstoff angereicherte Zone erkennbar (Abb. 58). Das Oberflächenprofil wirkt im Vergleich zu dem der anderen untersuchten Legierungen wesentlich glatter. An der Oberfläche ist ein aufgesintertes Partikel der Einbettmasse zu erkennen. Das abrasive Strahlen bewirkt eine deutliche Reduktion der oberflächlichen Reaktionsschicht. Die Oberfläche ist gleichmäßig aufgeraut, und vereinzelt erscheinen impaktierte Strahlkörner des abrasiven Mediums. Bei alleiniger Anwendung des Kugelstrahlmittels ist deutlich erkennbar, dass die oberflächliche Reaktionszone nicht ausreichend reduziert werden konnte. Das Profil besitzt eine gewisse Grundwelligkeit, die Oberfläche ist weitestgehend geglättet. Auch hier sind vereinzelt Einschläge der Strahlkugeln und verbliebene Strahlmittelrückstände zu sehen. Die günstigste Oberflächenstruktur ist nach kombinierter Anwendung von Strahlmittel 1 und 2 zu finden. Die sauerstoffreiche Zone kann durch das abrasive Strahlen deutlich reduziert werden (Abb. 58). Zudem erfolgt eine Reinigung der Oberfläche von der Gushaut. Nachfolgendes Kugelstrahlen ebnet die Oberfläche ein und glättet sie. Störungen der mikrokristallinen Struktur sind nicht ersichtlich. Somit resultiert eine gereinigte, glatte und homogene Oberfläche, deren oberflächliche Reaktionsschicht auf ein Mindestmaß reduziert werden konnte.

Die Betrachtung des Querschliffes im vorgeschliffenen Zustand (SiC220) zeigt, dass durch das Schleifen die sauerstoffangereicherte Zone komplett abgetragen wurde (Abtrag ca. 0,1mm). Der Ausgangszustand ist eine glatte, ebene Oberfläche ohne Reaktionsschicht (Abb. 59). Auffällig aber sind feine, rissförmige Strukturen, die von der Oberfläche ausgehen und als Gleitbänder beschrieben werden. Sie entstehen infolge einer Kaltverformung an Metalloberflächen und spiegeln Oberflächenspannungen wieder. Betrachtet man die vorgeschliffene Oberfläche nach Bearbeitung mit dem Micro-Finishing (Kombination von Strahlmittel 1 und 2), ist das massive Auftreten von Gleitbändern zu erkennen, die bis in eine Tiefe von ca. 30µm reichen (Abb. 60). Zudem sind steckengebliebene Strahlkugeln zu sehen. Das Oberflächenprofil wirkt unruhiger als beim Ausgangszustand.

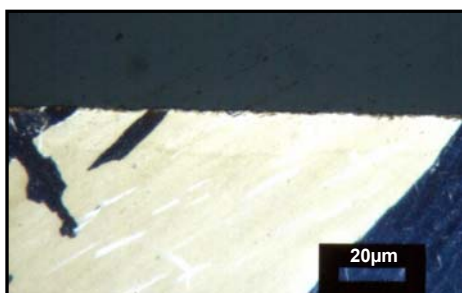


Abb. 59: Biotan, SiC 220, Farbbätzung

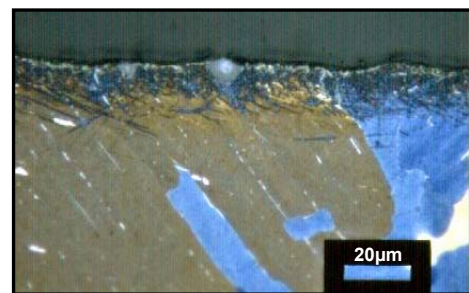


Abb. 60: Biotan, SiC220 + SM 1+2, Farbbätzung

Die Oberfläche des Querschliffs nach vorhergehender Bearbeitung mit SiC-Papier 1200er Körnung zeigt eine ebene, glatte und gereinigte Oberfläche ohne Anzeichen mikrokristalliner Störungen (Abb. 61). Wird diese Oberfläche nur mit dem Kugelstrahlmittel bearbeitet, so entstehen massive mikrokristalline Störungen in Form von Gleitbändern (Abb. 62). Diese sind bis in eine Tiefe von 25µm nachweisbar. Zahlreiche impaktierte Strahlkugeln sind an der

Oberfläche zu erkennen. Das Profil der Oberfläche wirkt auch hier wesentlich unruhiger und rauer als im Ausgangszustand.

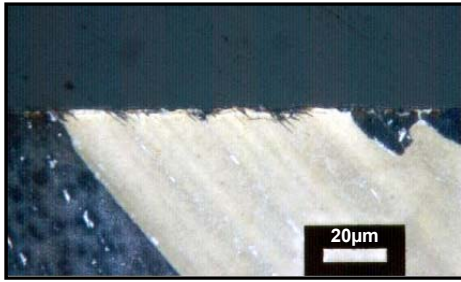


Abb. 61: Biotan, SiC1200, Farbätzung

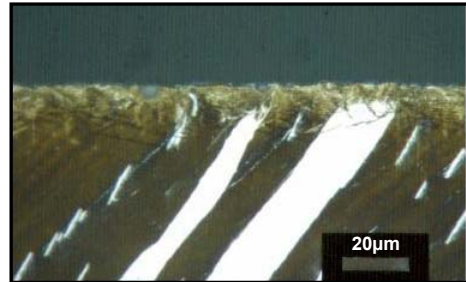


Abb. 62: Biotan, SiC 1200+SM2, Farbätzung

Es kann festgestellt werden, dass das Entstehen von Störungen der oberflächlichen Mikrostruktur auf die Anwendung der Strahlkugeln zurückzuführen ist. Diese Mikrostörungen oder Gleitbänder treten nur nach Bearbeitung der ungeschützten Titanoberfläche (nach vollständigem Abtrag der sauerstoffangereicherten und demzufolge härteren Schicht) auf.

## 5.2. Ecoclean

### 5.2.1. Metrisch erfassbare Größen

#### 5.2.1.1. Profilanalyse

Bei der profilographischen Untersuchung der Ecoclean-Prüfkörper wurden ebenfalls die Parameter gemittelte Rautiefe, arithmetischer Mittenrauwert, maximale Rautiefe und mittlerer Rillenabstand erfasst (siehe Kap. 5.1.1.1.). Die Mittelwerte von  $R_{ZD}$  und  $S_m$  sowie deren Streuung sind in Tab. 11 und den Abbildungen 63 - 68 dargestellt. Die vollständige Ergebnisdarstellung mit  $R_{ZD}$ ,  $R_a$ ,  $R_t$  und  $S_m$  wird im Anhang aufgeführt (Tabelle C).

Die Profilwerte im korundgestrahlten Zustand ( $Al_2O_3$  110µm) liegen für die mittlere Rauigkeit und den mittleren Rillenabstand bei allen drei untersuchten Materialien weitestgehend im gleichen Bereich (Tab. 11). Dabei weist der mittlere Rillenabstand Werte von  $S_m=34,7\mu m$  (Remanium GM380) bis  $39,7\mu m$  (Degudent H) auf. Die mittlere Rauigkeit liegt bei Remanium GM380 ( $R_{ZD}=7,7\mu m$ ) und Titan ( $R_{ZD}=7,7\mu m$ ) dicht beieinander, nur die **hochgoldhaltige Legierung** Degudent H weist eine stärkere Rauigkeit auf ( $R_{ZD}=10,8\mu m$ ). Diese kann durch die Anwendung des tensidischen Glanzbades II auf eine Rauigkeit von  $R_{ZD}=7,1\mu m$  signifikant reduziert werden (Abb. 63 und 64). Ebenfalls günstig wirkt sich das Glanzbad II auf den mittleren Rillenabstand aus: er steigt auf einen Wert von  $S_m=113,2\mu m$ . Auch bei der Anwendung des Glanzbades II auf den mit Siliziumkarbidpapier 220er Körnung vorgeschliffenen Zustand kann die mittlere Rauigkeit reduziert und der mittlere Rillenabstand erhöht werden. Der Zustand nach Bearbeitung der mit SiC-Papier 600er und 1200er Körnung vorgeschliffenen Oberflächen zeigt in der mittleren Rauigkeit eine Verschlechterung, die beim 600er Vorschleiff nicht signifikant, beim 1200er Vorschleiff aber



statistisch gesichert ist. Der mittlere Rillenabstand ist in beiden Fällen höher als im jeweiligen Ausgangszustand.

Tab. 11: Ergebnisübersicht der Profilwerte der mit dem Ecoclean-Verfahren bearbeiteten Prüfkörper

	Ergebnisübersicht Profilographie			
	gemittelte Rauhtiefe $R_{ZD}$		mittlerer Rillenabstand $S_m$	
	in $\mu m$	Stabw	in $\mu m$	Stabw
<b>DEGUDENT</b>				
$Al_2O_3$	10,79	1,22	39,69	4,26
+GB II	7,06	1,45	113,2	32,13
SiC220	3,61	0,65	20,03	3,83
+GB II	2,13	0,39	44,53	17,47
SiC600	1,33	0,26	16,6	1,08
+GB II	1,73	0,6	61,24	24,88
SiC1200	0,88	0,24	13,73	1,42
+GB II	1,74	0,67	32,62	19,33
<b>REMANIUM GM380</b>				
$Al_2O_3$	7,71	0,92	34,72	3,96
+GB I	5,38	0,9	51,42	16,14
+GB I+II	5,39	0,5	43,37	4,77
SiC220	1,19	0,26	24,68	5,66
+GB I	0,85	0,28	26,9	3,27
+GBI+II	1,04	0,3	17,39	2,25
SiC600	0,38	0,06	31,79	8,04
+GB II	0,5	0,07	46,61	11,95
SiC1200	0,35	0,03	41,78	10,77
+GB II	0,55	0,06	46	11,17
<b>BIOTAN</b>				
$Al_2O_3$	7,65	1,41	35,36	6,04
+GB I	6,36	0,88	38,43	6,54
+GB I+II	5,4	0,6	63,04	13,29
SiC220	1,72	0,33	21,39	2,32
+GB I	4,83	1,1	69,32	15,14
+GB I+II	5,16	1,04	79,75	20,63
SiC600	1,24	0,17	17,08	2,27
+GB II	1,17	0,24	23,74	6,62
SiC1200	0,85	0,13	17,75	3,04
+GB II	0,96	0,19	46,82	14,77

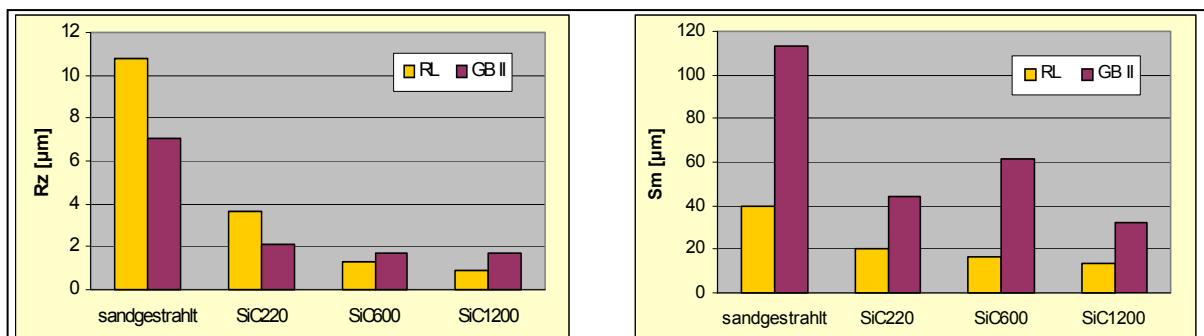


Abb. 63: Ergebnisse der Profilanalyse (gemittelte Rautiefe  $R_{ZD}$  und mittlerer Rillenabstand  $S_m$ ) der Degudent H Prüfkörper vor und nach Bearbeitung mit dem Ecoclean-Verfahren [RL = Ausgangszustand]

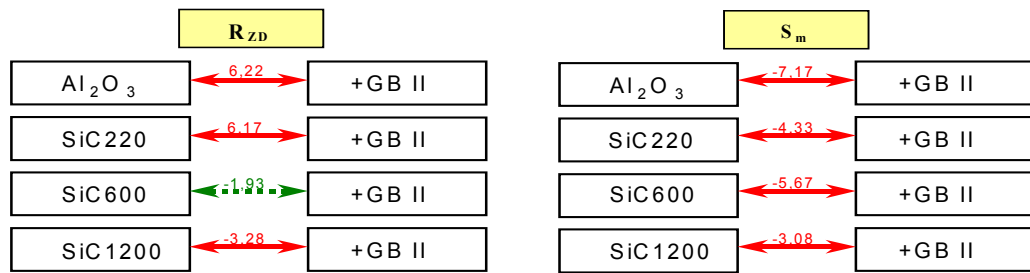


Abb. 64: Statistische Auswertung der Profilwerte der Degudent H Proben anhand des t-Testes; zweiseitige Fragestellung; Irrtumswahrscheinlichkeit: 1%;  $t_{\text{tab}}=2,88$ ; FG=18  
 ←→ =signifikant, ←·····→ =nicht signifikant

Die Bearbeitung der **Kobaltbasislegierung** Remanium GM 380 im korundgestrahlten Zustand (Abb. 65) zeigt nach Anwendung des aggressiveren Beizbades eine Reduktion der mittleren Rauigkeit auf  $R_{ZD}=5,4\mu\text{m}$  und eine Erhöhung des mittleren Rillenabstandes auf  $S_m=51,4\mu\text{m}$ . Durch zusätzliche Anwendung von Glanzbad II im Anschluss an das Bad I können diese Werte nicht signifikant verändert werden, so dass eine die Oberfläche einebnende Wirkung des Glanzbades II nicht nachgewiesen werden kann (Abb. 66). Die Auswirkungen des Bades II auf die vorgeschliffene Oberfläche (SiC220, SiC600, SiC1200) ist nur in kleinen metrischen Bereichen erfassbar: Anstieg der mittleren Rauigkeit bei SiC600 von  $R_{ZD}=0,38\mu\text{m}$  auf  $0,5\mu\text{m}$ ; bei SiC1200 von  $R_{ZD}=0,35\mu\text{m}$  auf  $0,55\mu\text{m}$ . Infolge einer geringen Streuung sind beide Unterschiede statistisch gesichert (Abb. 66).

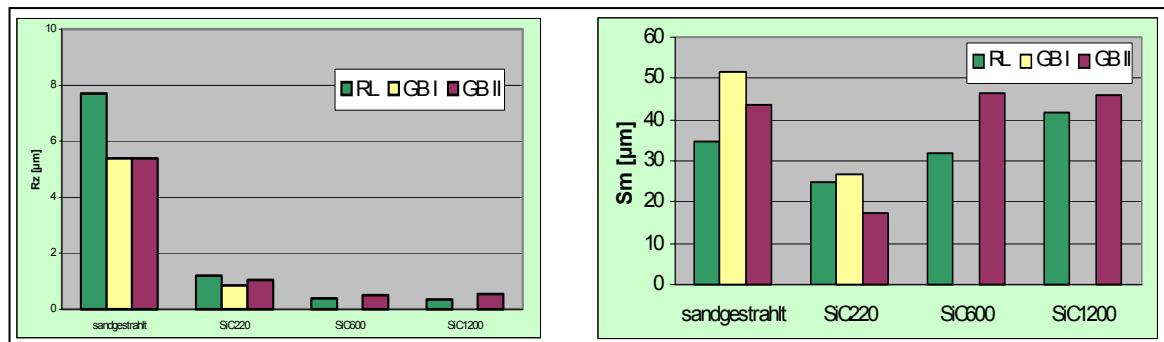


Abb. 65: Ergebnisse der Profilanalyse (gemittelte Rautiefe  $R_{ZD}$  und mittlerer Rillenabstand  $S_m$ ) der Remanium GM380 Prüfkörper vor und nach Bearbeitung mit dem Ecoclean-Verfahren [RL=Ausgangszustand]

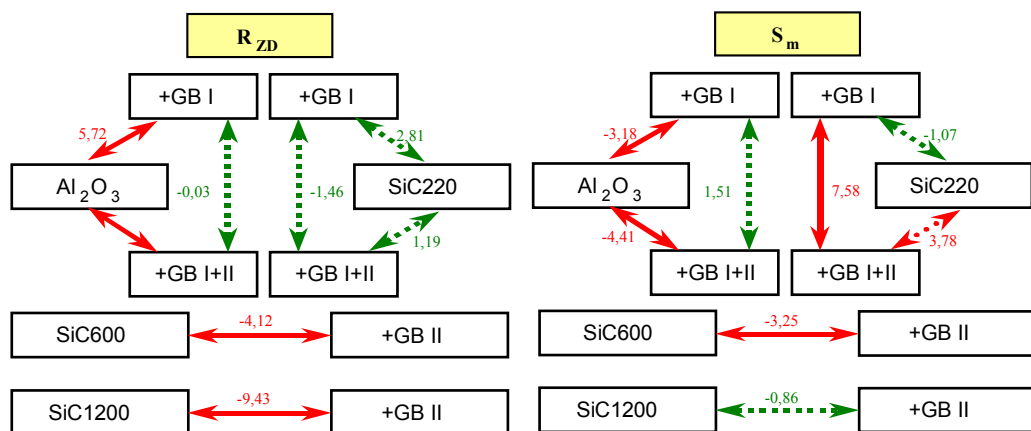


Abb. 66: Statistische Auswertung der Profilwerte der Remanium GM380 Proben anhand des t-Testes; zweiseitige Fragestellung; Irrtumswahrscheinlichkeit: 1%;  $t_{\text{tab}}=2,88$ ; FG=18  
 ←→ =signifikant, ←·····→ =nicht signifikant

Betrachtet man die korundgestrahlten Gussproben des **Titan**, so ist eine Abnahme der mittleren Rauigkeit und ein leichter Anstieg des mittleren Rillenabstandes durch die Bearbeitung im Glanzbad I zu verzeichnen (Abb. 67). Diese Differenzen sind jedoch nicht statistisch gesichert (Abb. 68). Die zusätzliche Anwendung des Glanzbades II führt zu einer weiteren Reduktion der Rautiefe ( $R_{ZD}=5,4\mu\text{m}$ ), die im Vergleich zu der Bearbeitung mit Glanzbad I ( $R_{ZD}=6,4\mu\text{m}$ ) zwar nicht signifikant, aber in bezug auf den Ausgangszustand (korundgestrahlte Oberfläche;  $R_{ZD}=7,7\mu\text{m}$ ) statistisch gesichert ist. Der mittlere Rillenabstand zeigt nach zusätzlicher Bearbeitung im Glanzbad II einen deutlich signifikanten Anstieg der Messwerte (sandgestrahlt:  $S_m=35,4\mu\text{m}$ ; nach GB II:  $S_m=63,0\mu\text{m}$ ). Wird Titan im vorgeschliffenen Zustand (SiC220) mit dem Ecoclean bearbeitet, so führt dies nach Anwendung des Glanzbades I zu einer deutlichen Verschlechterung infolge erhöhter Rauigkeiten: SiC220:  $R_{ZD}=1,72\mu\text{m}$ ; SiC220 + GB I:  $R_{ZD}=4,83\mu\text{m}$ . Zwar kann der mittlere Rillenabstand ebenfalls erhöht werden (Abb. 67), jedoch reicht dies zur Einebnung des Oberflächenprofils nicht aus. Eine zusätzliche Anwendung des Glanzbades II führt zu keiner signifikanten Veränderung (Abb. 67 und 68). Die Messwerte für die feingeschliffenen Prüfkörper (SiC600+1200) zeigen im wesentlichen die gleichen Tendenzen wie die Bearbeitung der mit SiC-Papier 220er Körnung vorgeschliffenen Prüfkörper: keine signifikante Veränderung der mittleren Rauigkeit durch Glanzbad II, dagegen eine statistisch gesicherte Erhöhung des mittleren Rillenabstandes.

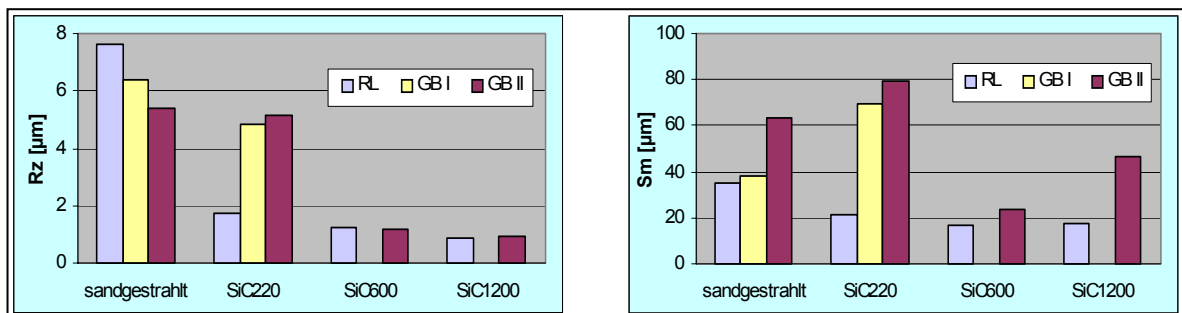


Abb. 65: Ergebnisse der Profilanalyse (gemittelte Rautiefe  $R_{ZD}$  und mittlerer Rillenabstand  $S_m$ ) der Biotan Prüfkörper vor und nach Bearbeitung mit dem Ecoclean-Verfahren [RL=Ausgangszustand]

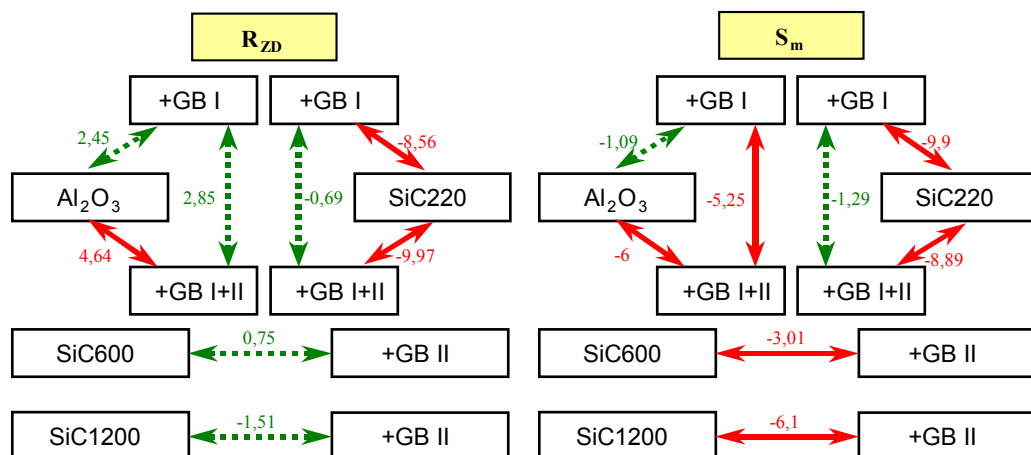


Abb. 68: Statistische Auswertung der Profilwerte der Biotan Proben anhand des t-Testes; zweiseitige Fragestellung; Irrtumswahrscheinlichkeit: 1%;  $t_{\text{tab}}=2,88$ ; FG=18  
 → =signifikant, ⇄ =nicht signifikant

### 5.2.1.2. Glanzgrad

Zur quantitativen Ermittlung des Reflexionsvermögens wurde der Parameter des "Glanzgrades" aufgenommen. Die Ergebnisse und deren Standardabweichung sind in Tabelle 12 und den Abbildungen 69 -71 dargestellt.

Tab. 12: Ergebnisse der Glanzgradmessungen [%] der mit dem Ecoclean-Verfahren bearbeiteten Prüfkörper

Ausgangszustand	DEGUDENT H		REMANIUM GM 380			BIOTAN		
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Stabw	+GB II Stabw	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Stabw	+GB I Stabw	+GBII Stabw	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Stabw	+GB I Stabw	+GB II Stabw
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	58 1,05	70,6 4,95	43 1,94	62 1,94	65,3 1,89	36,4 1,26	43,9 4,56	69,2 3,16
SiC220	80,6 2,32	91,6 0,52	82,2 5,45	91,7 1,95	91,4 1,17	83 3,23	65,8 3,55	81,4 2,12
SiC600	85,2 1,81	92,1 1,66	92,5 1,08		95 0	85,2 3,58		89,5 1,84
SiC1200	84,8 3,68	92,9 0,99	93,4 0,52		94,4 0,84	84,4 1,26		92 1,7

Die Bearbeitung der korundgestrahlten **hochgoldhaltigen Legierung** mit dem Glanzbad II zeigt einen deutlich positiven Effekt (Steigerung des Reflexionsvermögens von 58% auf 70,6%), der im Vergleich zu den anderen Legierungen jedoch geringer ausfällt (Tabelle 12). Der Glanzgrad der vorgeschliffenen Degudent H - Oberflächen weist nach Bearbeitung mit dem Glanzbad II nur gering positive Effekte nach. Die Differenzen zwischen Ausgangs- und Endzustand liegen bei SiC220, SiC600 und SiC1200 zwischen 7% und 11% (Abb. 69).

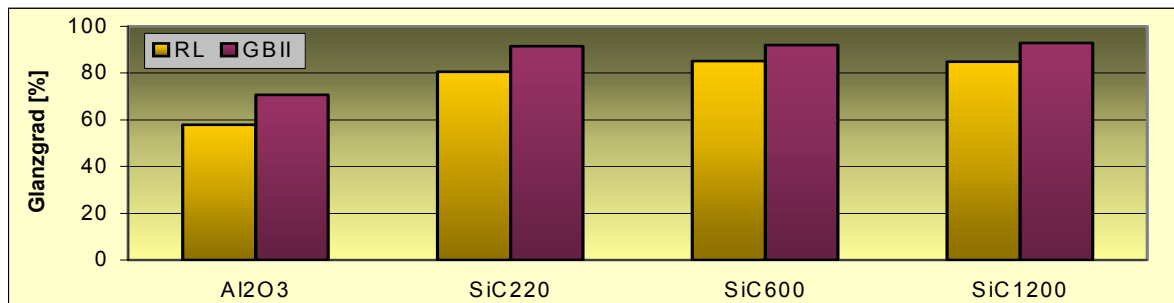


Abb. 69: Glanzgrad von Degudent H-Proben im korundgestrahlten und vorgeschliffenen Zustand vor und nach Ecoclean [RL=Ausgangszustand]

Die Messung der Reflexion der **Kobaltbasislegierung** (Abb. 70) zeigt bei der Bearbeitung des korundgestrahlten Ausgangszustandes eine deutliche Zunahme des Glanzgrades: durch das Glanzbad I konnte der Reflexionsgrad von 43% auf 62% gesteigert werden. Das anschließend reinigende Glanzbad II erzielt nur eine geringe Steigerung auf 65,3%. Die Auswirkungen des Ecoclean auf die vorgeschliffene Oberfläche des Remanium GM380 ist weniger deutlich. Während der Glanzgrad der mit 220er Nassschliff vorgeschliffenen Oberfläche nach dem Glanzbad I von 82,2% auf 91,7% steigt, bleibt dieser nach Anwendung des Glanzbades II bei 91,4%. Die Messwerte des Glanzgrades der mit SiC-Papier 600er und 1200er Körnung vorgeschliffenen Oberflächen liegen im Ausgangszustand und nach Anwendung des Glanzbades II im gleichen Bereich (Abb. 70).

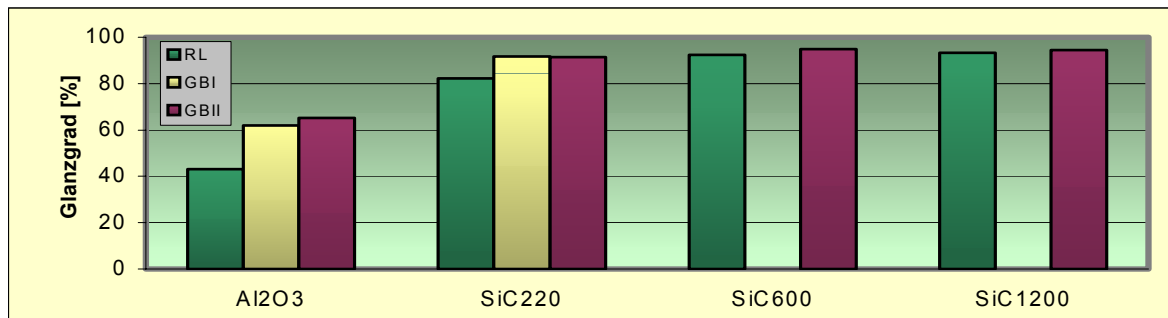


Abb. 70: Glanzgrad von Remanium GM380-Proben im korundgestrahlten und vorgeschliffenen Zustand vor und nach Ecoclean [RL=Ausgangszustand]

Auch beim Bearbeiten von **Titan** mit dem Ecoclean wird die stärkste Wirkung auf die korundgestrahlte Oberfläche erzielt. Hier erreicht das aggressive Glanzbad I eine Steigerung des Reflexionsvermögens von 36,4% auf 43,9%, das nach zusätzlicher Anwendung des Glanzbades II weiter auf 69,2% erhöht wird. Wird das Ecoclean auf die mit 220er Nassschliff vorgeschliffene Oberfläche des Titans angewendet, so wird das Glanzvermögen zunächst reduziert (von 83% auf 65,8%) und danach durch das Glanzbad II auf etwa das Niveau des Ausgangszustandes (81,4%) angehoben. Auch bei Titan zeigt die Anwendung des Glanzbades II auf die feingeschliffene Oberfläche (SiC600, SiC1200) einen nur sehr geringen Effekt (Abb. 71).

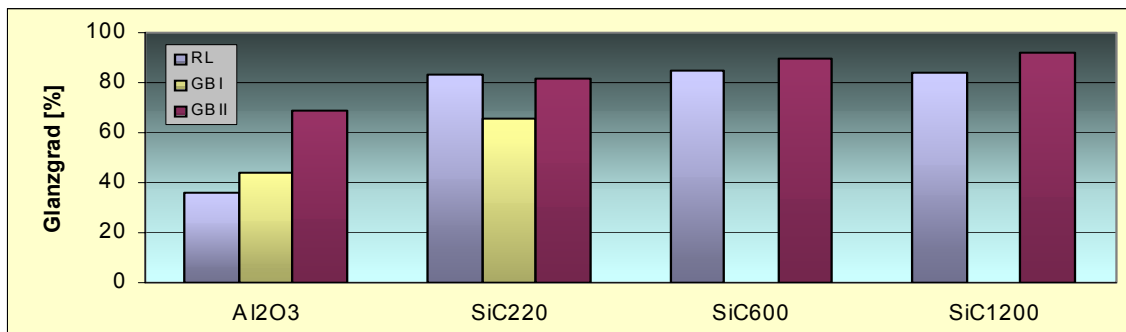


Abb. 70: Glanzgrades von Biotan-Proben im korundgestrahlten und vorgeschliffenen Zustand vor und nach Ecoclean [RL=Ausgangszustand]

### 5.2.1.3. Mikrohärte

Die Mikrohärtemessungen (MHV 0,02) an den im Ecoclean-Verfahren behandelten Proben hatten die Aufgabe, eine eventuelle Kaltverfestigung der Oberflächen durch Einwirkung der Stahlnadeln nachzuweisen. Die Prüfungen erfolgten daher auf den Oberflächen, wobei wegen der Rauigkeit nur die mit 1200er Nassschleifpapier bearbeiteten Prüfkörper untersucht wurden. Die Härteprüfungen wurden vor und nach Behandlung im Glanzbad II durchgeführt. Die Ergebnisse, deren Standardabweichung und die statistische Auswertung mittels t-Test werden in der Tabelle 13 dargestellt.

Tab. 13: Ergebnisse der Mikrohärtemessungen (MHV 0,02) und deren statistische Auswertung mittels t-Test an feingeschliffenen Proben von Degudent H, Remanium GM380 und Biotan vor und nach Ecoclean (zweiseitige Fragestellung, Irrtumswahrscheinlichkeit 1%)

	SiC1200	Stabw	t-Wert	SiC1200 +GBII	Stabw
Degudent H	223 n=40	43,37	<b>11,67</b> $t_{\text{tab}}=2,66$	189 n=40	70,03
Remanium GM 380	651 n=40	156,04	<b>-14,24</b> $t_{\text{tab}}=2,66$	766 n=40	166,8
Titan	467 n=20	84,27	<b>2,82</b> $t_{\text{tab}}=2,75$	439 n=20	112,6

Die Unterschiede in der Mikrohärte vor und nach Bearbeitung der einzelnen Metalle sind alle signifikant, wobei aber die Auswirkung auf die einzelnen Materialien unterschiedlich ist:

Die Oberflächenhärte der **Goldlegierung** liegt bei 223 Graden nach Vickers. Durch die Bearbeitung mit dem Glanzbad II fiel die Mikrohärte signifikant auf 189. Die deutliche Signifikanz zeichnet sich durch die große Differenz zwischen errechnetem t-Wert ( $t = 11,67$ ) und tabellarischem t-Wert ( $t = 2,66$ ) aus.

Bei der härteren **Kobaltbasislegierung** konnte ein Anstieg der oberflächlichen Härte von 651 auf 766 ermittelt werden. Auch zeigt die statistische Auswertung eine deutliche Signifikanz (errechneter t-Wert =  $-14,24$ ; tabellarischer t-Wert =  $2,66$ ).

Die Untersuchung des **Titans** zeigt eine leichte Reduktion der Härte von 467 auf 439 Grade nach Vickers. Auch hier konnte der Unterschied statistisch gesichert werden, wobei die Differenz zwischen errechnetem und tabellarischen t-Wert nicht so groß ist wie bei den anderen untersuchten Materialien (errechneter t-Wert =  $2,82$ ; tabellarischer t-Wert =  $2,75$ ).

### 5.2.2. Bildgebende Verfahren

#### 5.2.2.1. Lichtmikroskopische Untersuchungen

Die lichtmikroskopische Untersuchung der mit dem Ecoclean-Verfahren bearbeiteten Proben zeigten folgende Charakteristika:

Die korundgestrahlte Oberfläche der **hochgoldhaltigen Legierung** zeigt eine regelmäßig aufgeworfene, raue Struktur. Die scharfen Schneidspuren der abrasiven Vorbehandlung sind relativ lang und tief. Nach Behandlung im Glanzbad II ist eine gleichmäßige Oberflächenstruktur entstanden, wobei abgerundete Profilerhebungen ein eher verwaschenes Bild der Oberfläche vermitteln.

Die mit unterschiedlichen Körnungen vorgeschliffenen Oberflächen der Degudent H - Proben ähneln sich in ihrem Oberflächenzustand. Sie weisen parallele Schleifspuren auf, die sich abhängig von der Körnung des verwendeten Schleifpapiers nur in der Dichte der Schleifspuren unterscheiden (Abb. 72).



Auch nach Bearbeitung im Glanzbad II sind keine auffälligen Unterschiede vorhanden. Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der korundgestrahlten und im Glanzbad II behandelten Oberfläche. Vereinzelt sind Spuren des vorangegangenen Nassschliffes zu sehen (Abb. 73)

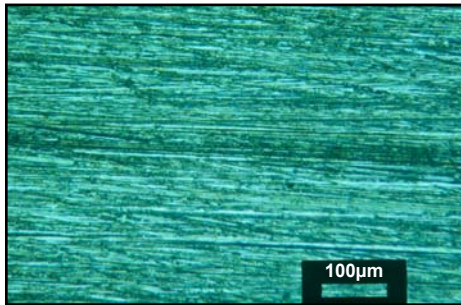


Abb. 72: Degudent H, SiC 600

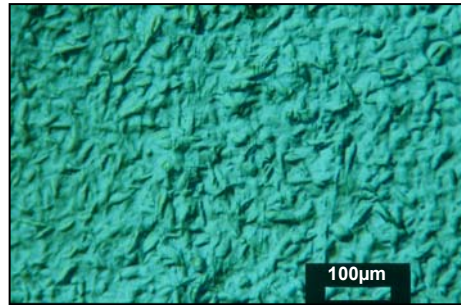


Abb. 73: Degudent H, SiC 1200+GB II

Die geringsten sichtbaren Auswirkungen hat das Ecoclean auf die harte **Kobaltbasislegierung**. Die Oberfläche im korundgestrahlten Zustand zeigt sich ähnlich der der Goldlegierung regelmäßig strukturiert mit scharfkantigen Profilerhebungen (Abb. 74). Jedoch erscheinen die Schnittspuren des Strahlkornes nicht so tief und ausgeprägt wie bei der weicheren Goldlegierung. Die Bearbeitung im Glanzbad I bewirkt einen gewissen Glättungseffekt (Abb. 75). Die Profilerhebungen sind nicht mehr so scharfkantig, die Oberflächenstruktur wirkt etwas verwaschen. Zwischen der alleinigen Anwendung von Glanzbad I und der zusätzlichen Verwendung des Bades II zeigt sich kein deutlicher Unterschied.

Die Aufnahmen der mit 220er SiC-Papier vorgeschliffenen Oberfläche und deren Bearbeitung mit dem Glanzbad I zeigen ebenfalls keinen Unterschied (Abb. 76). Lediglich die zusätzliche Anwendung des Glanzbades II bewirkt, dass die Oberfläche etwas verwaschen erscheint (Abb. 77). Während die ursprünglichen Schleifspuren noch deutlich zu erkennen sind, zeigen sich zusätzlich leichte Einschläge der Nadeln. Auch nach Anwendung des Glanzbades II auf die mit SiC-Papier 600er und 1200er Körnung vorgeschliffene Oberfläche zeigen sich kaum Unterschiede. Zwar sind einzelne Eindrücke der Nadeln zu erkennen, und die Schleifspuren erscheinen ebenfalls verwaschen, aber die Wirkung des vorhergegangenen Nassschliffes ist noch deutlich zu sehen.

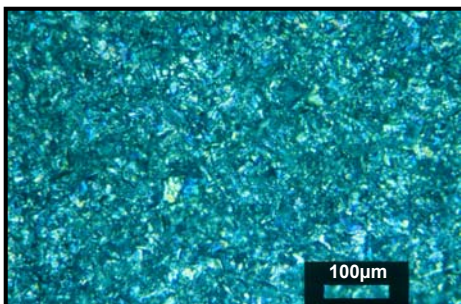


Abb. 74: Remanium GM380,  $\text{Al}_2\text{O}_3$

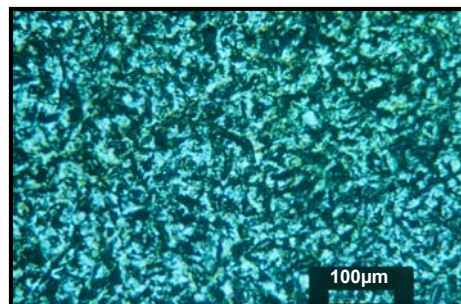


Abb. 75: Remanium GM380,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ +GB I+II

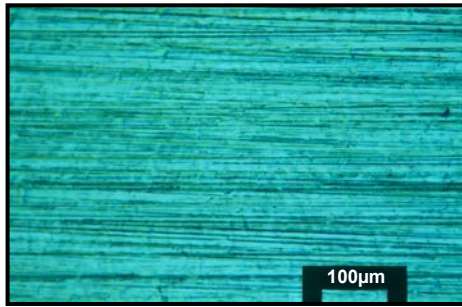


Abb. 76: Remanium GM380, SiC 220+GB I

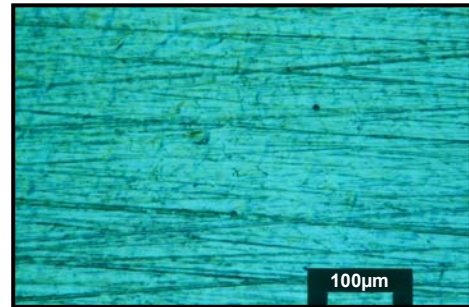


Abb. 77: Remanium GM380, SiC 220+GB I+II

Die Wirkung des Ecoclean auf die Oberfläche des **Titan** stellt sich wesentlich deutlicher dar. Die korundgestrahlte Oberfläche des Titan gleicht in ihrer Morphologie jener der Kobaltbasislegierung. Nach Anwendung des Glanzbades I zeigt sich lediglich eine etwas verwaschene Oberfläche, die in ihrer Grundstruktur dem Ausgangszustand ähnlich ist (Abb. 78). Die scharfkantigen Grade der abrasiven Strahlkörner scheinen etwas abgerundet zu sein. Wesentlich deutlicher ist dagegen der Einfluss des zusätzlichen Glanzbades II (Abb. 79). Die Oberfläche ist in ihrer Struktur völlig verändert. Es sind deutlich Eindrücke der Nadeln zu erkennen. Die Oberfläche wirkt gröber und unebener, jedoch sind keine scharfkantigen Grade mehr erkennbar. Auch die Anwendung des Glanzbades I auf die mit 220er Nassschliff vorgearbeitete Oberfläche (in ihrer Morphologie wie die der anderen untersuchten Legierungen) zeigt eine Veränderung der Struktur: Es sind großflächige Eindrücke der Nadeln erkennbar, die eine ungleichmäßige, unebene, aber nicht scharfkantige Struktur bewirken (Abb. 80). Die zusätzliche Anwendung des Glanzbades II scheint diese Struktur noch weiter abzurunden und welliger zu gestalten (Abb. 81). Etwas geringer ist der Effekt des Glanzbades auf die mit 600er und 1200er Nassschliff vorgearbeitete Oberfläche. Auch hier sind die Eindrücke der Nadeln zu sehen. Während bei vorangegangenen 600er Nassschliff die Grundstruktur des Schliffes noch zu erkennen ist, sind bei vorherigem 1200er Nassschliff nur noch Spuren des Schliffes zu sehen. Die Oberfläche hat eine wellige und gleichmäßig strukturierte Beschaffenheit.

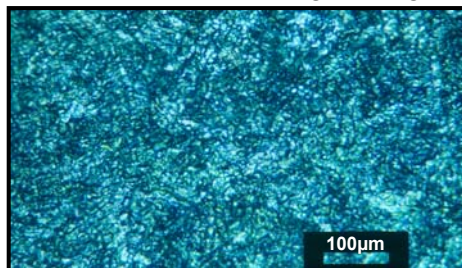


Abb. 78: Biotan, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+GB I

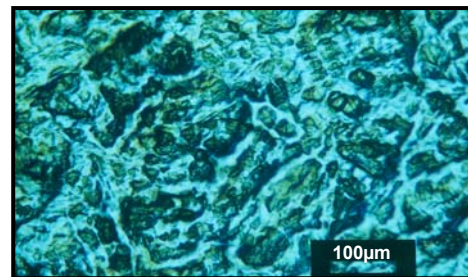


Abb. 79: Biotan, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+GB I+II

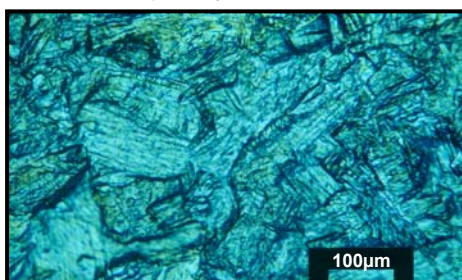


Abb. 80: Biotan, SiC 220+GB I

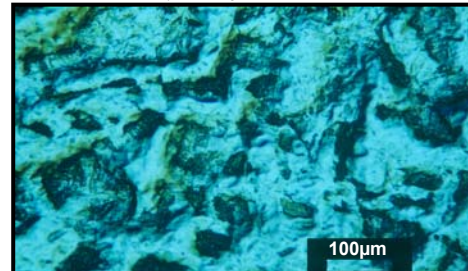


Abb. 81: Biotan, SiC 220+GB I+II



#### 5.2.2.2. Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Zur detaillierten Auswertung wurden ausgewählte Proben der Versuchsreihe im Rasterelektronenmikroskop dargestellt. Die Aufnahmen erfolgten in 1200facher Vergrößerung.

Die **hochgoldhaltige Legierung** Degudent H zeigt im korundgestrahlten Zustand eine stark aufgeraute, ungleichmäßige Oberfläche. Deutlich sind tiefe, ausgeprägte Schneidspuren des abrasiven Strahlkornes zu erkennen (Abb. 82). Besonders eindrucksvoll stellt sich das impaktierte Kristall eines Einbettmasserestes dar, der beim Guss von der Legierung zur Hälfte umschlossen wurde und eine Verunreinigung der Oberfläche darstellt. Besonders auffällig ist der deutliche Unterschied zur Oberflächenstruktur nach Anwendung des Glanzbades II auf die korundgestrahlte Oberfläche (Abb. 83). Es sind großflächige ebene Strukturen zu erkennen, die teilweise durch Abtrag und teilweise durch Einebnung der Profilerhebungen entstanden sind. Vereinzelt Reste tiefer liegender Abschnitte sind in Form kleinflächiger krater-ähnlicher Einbrüche vorhanden und bewirken, dass selbst nach anschließender nicht abtragender Politur die Oberfläche nicht ausreichend vergütet werden kann.

Die Oberflächenstruktur des vorgeschliffenen Zustandes (SiC220) zeigt die gleichmäßigen Schleifspuren des SiC-Papiers, welche die Oberfläche geradlinig und in parallelen Spuren durchpflügen. Die Anwendung des Glanzbades II bewirkt eine starke Glättung. Weite, ebene und glatte Flächen sind neben vereinzelt Resten der Schleifspuren zu sehen (Abb. 84). Diese sind wesentlich flacher als die verbliebenen Oberflächendefekte nach Bearbeitung der korundgestrahlten Prüfkörperoberfläche.

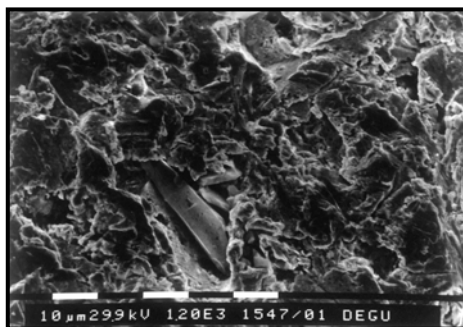


Abb. 82: Degudent H,  $\text{Al}_2\text{O}_3$

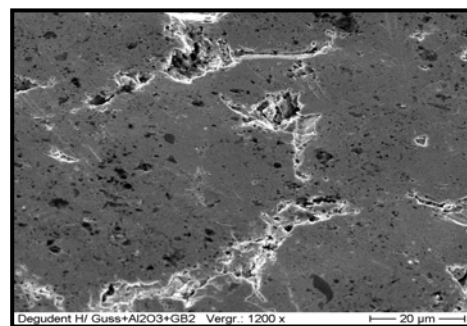


Abb. 83: Degudent H,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ +GB II

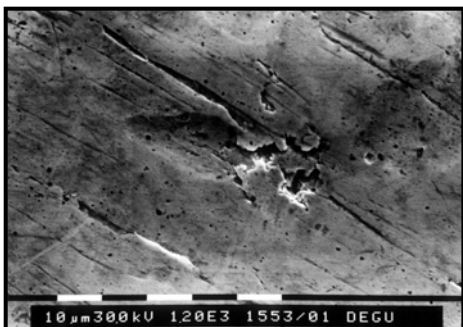


Abb. 84: Degudent H, SiC 220+GB II

Bei der Darstellung der **Kobaltbasislegierung** im korundgestrahlten Zustand zeigt sich ebenfalls das Bild einer unebenen, stark aufgerauten Oberfläche (Abb. 85). Auch hier sind deutliche Spuren des Strahlkornes in Form langer, ausgeprägter Schnitte zu sehen. Die Anwendung des Glanzbades I erzielt nur einen geringen Effekt (wie bereits in der Lichtmikroskopie erkennbar). Die höchsten Erhebungen scheinen abgeflacht zu sein, jedoch die tiefer liegenden Strukturen sind unverändert. Die zusätzliche Anwendung des Glanzbades II bewirkt eine weitere leichte Glättung der oberflächlichen Strukturen (Abb. 86). Die flachen, glatten Bereiche sind größer, jedoch sind die tiefer liegenden Strukturen unverändert.

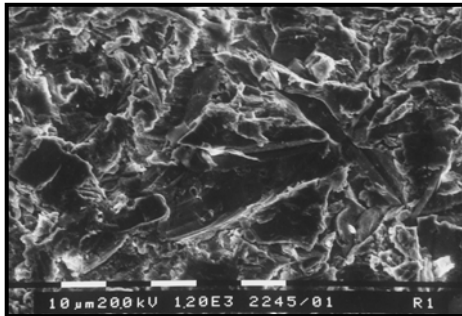


Abb. 85: Remanium GM380,  $\text{Al}_2\text{O}_3$

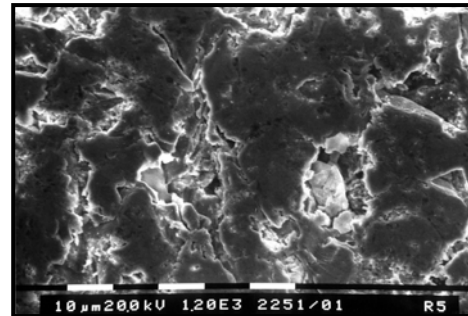


Abb. 86: Remanium GM380,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + GB I+II

Bei der Betrachtung des **Titans** im korundgestrahlten Zustand fallen wiederum die ausgeprägten Schneidspuren des scharfkantigen Edelkorundes auf (Abb. 87). Die Oberfläche ist sehr aufgeworfen und rau. Eine deutliche Veränderung bewirkt das Glanzbad I (Abb. 88). Die scharfkantigen Profilerhebungen sind abgerundet beziehungsweise eingeebnet. Es entsteht der Eindruck einer weitestgehend geglätteten, teilweise etwas unebenen Oberfläche. Vereinzelt sind wieder die Eindrücke der Nadeln zu erkennen. Die zusätzliche Anwendung von Glanzbad II bewirkt eine weitere Glättung und Einebnung der Oberfläche (Abb. 89). Großflächige, glatte Bereiche charakterisieren das Bild, die von vereinzelt tiefer liegenden Stellen unterbrochen werden.

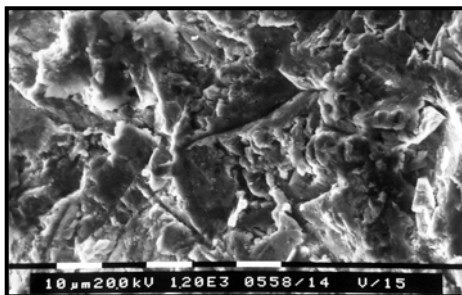


Abb. 87: Biotan,  $\text{Al}_2\text{O}_3$

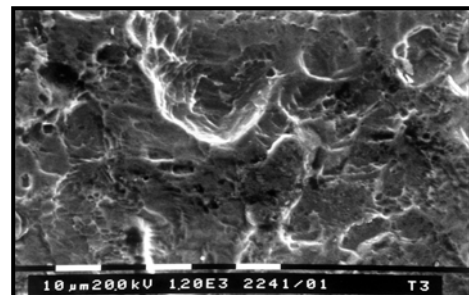


Abb. 88: Biotan,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + GB I

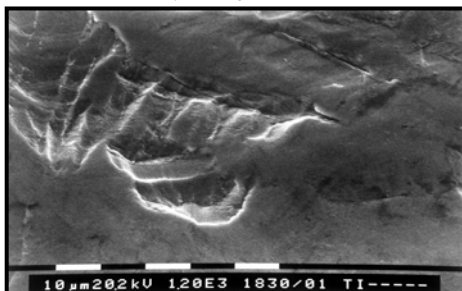


Abb. 89: Biotan,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + GB I+II

### 5.2.2.3. Metallographie

Um die Profilstruktur bildlich zu charakterisieren und eventuelle Strukturveränderungen oberflächennaher Schichten zu erfassen, wurden ausgewählte Proben metallographisch aufbereitet und in 225facher Vergrößerung dargestellt. Die Aufbereitung erfolgte wie in Kap. 3.4.2.3. beschrieben.

Für die metallographischen Untersuchungen der **Degudent H** Proben wurden der mit Nassschliff 220er Körnung vorgeschliffene Zustand und dessen Bearbeitung ausgewählt.

Der Ausgangszustand zeigt eine unregelmäßige und zerklüftete Oberfläche mit zahlreichen spitzen Profilerhebungen (Abb. 90). Wird diese Oberfläche mit dem Glanzbad II bearbeitet, so wird sie stark eingeebnet und geglättet. Spitze Profilerhebungen sind nicht mehr zu erkennen. Der deutliche Glättungseffekt ist auf die geringe Härte und Duktilität der Goldlegierung und demzufolge auf die mechanische Wirkung der Glanznadeln zurückzuführen.

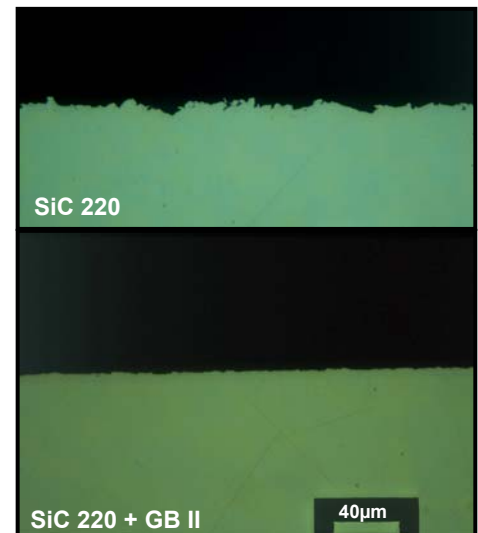


Abb. 90: Degudent H, SiC220 und Bearbeitung mit Ecoclean (GBII), Querschliffe, ungeätzt

Die Profilstruktur der korundgestrahlten **Kobaltbasislegierung** zeigt eine sehr raue und ungleichmäßige Oberfläche mit starker Zerklüftung (Abb. 91). Wird diese Oberfläche mit dem Glanzbad I bearbeitet, so ist ein gewisser Abtrag zu erkennen, indem die obersten Spitzen der Profilerhebungen abgeflacht erscheinen. Im wesentlichen zeigt sich die Profilstruktur jedoch wie im Ausgangszustand. Die zusätzliche Anwendung des Glanzbades II bewirkt eine weitere Abflachung der Profilerhebungen. Die tiefer liegenden Strukturen sind jedoch weiterhin unverändert. Die Bearbeitung der Kobaltbasislegierung durch das Ecoclean erzielt aufgrund der größeren Härte keine zufriedenstellende Verbesserung der Oberflächenstruktur. Die kinetische Energie der Glanznadeln ist nicht ausreichend, um die harte Legierung ausreichend zu deformieren.

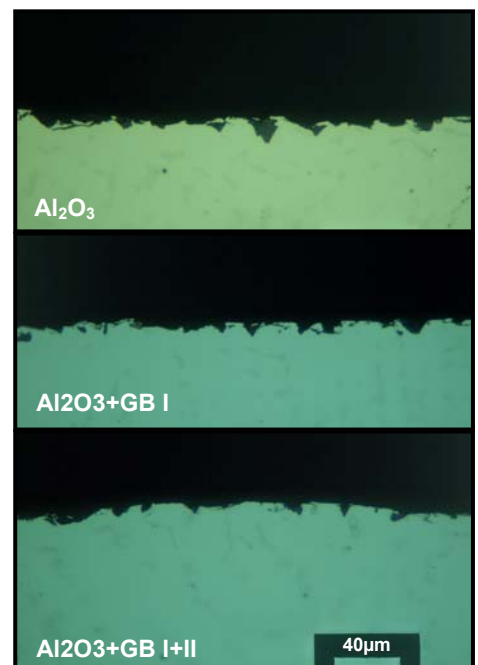


Abb. 91: Remanium GM380, korundgestrahlt und Bearbeitung mit Ecoclean (GBI, GBII), Querschliffe, ungeätzt

Die korundgestrahlte Oberfläche des **Titans** zeigt eine stark aufgeworfene, zerklüftete Struktur (Abb. 92). Durch die kaltverformende Wirkung des Strahlkorundes entstehen Gleitbänder, die bis in eine Tiefe von ca. 20µm reichen und Ausdruck von Oberflächenverspannungen sind. Die Bearbeitung im Glanzbad I bringt eine vorwiegend glatte aber relativ unebene und gewellte Oberfläche. Die Rauigkeiten des korundgestrahlten Zustandes sind völlig eingeebnet beziehungsweise abgetragen. Störungen der Mikrostruktur (Gleitbänder) sind nicht zu sehen. Die durch das Strahlen aufgeraute und somit vergrößerte Oberfläche bietet eine große Angriffsfläche für das Beizbad I, welches durch zusätzliche mechanische Einwirkung der Glanznadeln die oberflächennahe und durch Gleitbänder veränderte Schicht abtragen kann. Die Glanznadeln erzeugen aber nicht so viel mechanische Energie, dass es zu erneuten Gleitbändern kommen kann. Nach zusätzlicher Anwendung des Glanzbades II resultiert eine weitere Glättung. Die weiße, also sauerstoffangereicherte Schicht ist noch weiter reduziert. Ebenfalls können keine mikrokristallinen Störungen festgestellt werden.

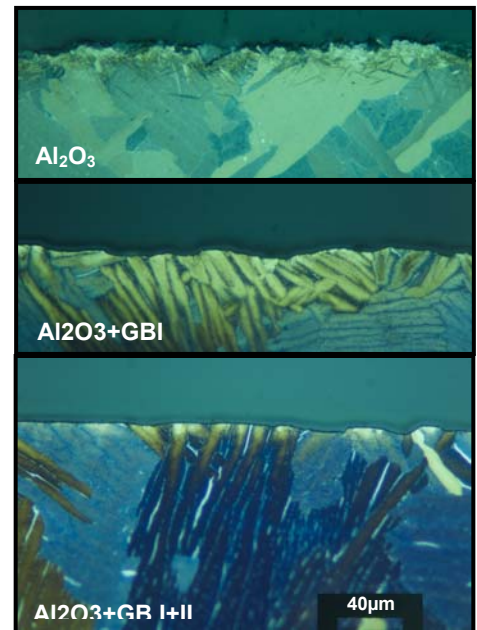


Abb. 92: Biotan, korundgestrahlt und Bearbeitung mit Ecoclean (GBI, GBII), Querschliffe, Farbätzung

## 6. DISKUSSION

### 6.1. Diskussion der Untersuchungsmethoden

Der Zielstellung der vorliegenden experimentellen Arbeit entsprechend, sollte die Auswirkung zweier alternativer Bearbeitungsverfahren auf Oberflächeneigenschaften und Oberflächenstruktur metallischer Dentalmaterialien überprüft werden. Hierfür müssen die jeweiligen Oberflächenzustände im Ausgangszustand und nach den einzelnen Bearbeitungsstufen adäquat untersucht und bewertet werden. Es waren daher Untersuchungsmethoden auszuwählen, die eine differenzierte, qualitative und quantitative Charakterisierung der Oberflächen ermöglichen.

Die Oberflächenqualität individuell gefertigter zahnärztlicher Therapiemittel wird wesentlich von der Oberflächengestalt (Kap. 2.2.) bestimmt. Diese kann sowohl visuell, als auch taktil erfasst werden. Der visuellen Betrachtung ist durch das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges eine natürliche Grenze gesetzt (entspricht etwa einem Sehwinkel von 1 Bogenminute), die durch Hilfsmittel erweitert werden kann. So kann durch die Auflichtmikroskopie eine Vergrößerung bis zu der Wellenlänge des verwendeten Lichtes (1500-2000fach) erreicht werden, dagegen kann die Vergrößerung im Rasterelektronenmikroskop (REM) bis zu 50000fach betragen. Die Auflichtmikroskopie ist aufgrund ihrer geringeren Tiefenschärfe nur bedingt für die Beurteilung von Oberflächen geeignet, wogegen sie bei der Betrachtung der metallographischen Querschliffe (plane Flächen) gut geeignet ist. Für die Beurteilung von Oberflächen zeigt sich das REM durch seine größere Tiefenschärfe als wesentlich günstiger [Blumenauer 1994].

Durch die visuelle Untersuchung besteht nur die Möglichkeit einer zweidimensionalen Darstellung der Prüfkörperoberfläche. Die dritte Ebene kann durch taktile (profilographische) Untersuchungsmethoden metrisch erfasst und über die Aufnahme von Rauheitsparametern objektiv vergleichbar gemacht werden. In vorliegender Untersuchung kam ein Tastschnittverfahren zur Anwendung, wobei durch eine feine Nadelspitze das Oberflächenprofil abgetastet wird. Dabei sind der Genauigkeit der Messergebnisse gewisse, aber nicht relevante Grenzen aufgrund des Durchmessers der Nadelspitze gegeben (Diamantkegel mit 5µm Durchmesser). Berührungslose Verfahren wie Lichtschnitt- oder Laser-Konfokal-Mikroskopie werden vorzugsweise zur Untersuchung weicher Materialien verwendet.

Um eine optimale Vergleichbarkeit vorliegender Untersuchungsergebnisse mit anderen Arbeiten zu erreichen wurden die Rauheitsparameter  $R_a$ ,  $R_t$ ,  $R_{ZD}$  und  $S_m$  erfasst (siehe Kap. 4.3.1.). Dabei sind der Mittenrauwert ( $R_a$ ) und die maximale Rautiefe ( $R_t$ ) am weitesten verbreitet, während die gemittelte Rautiefe ( $R_{ZD}$ ) die größte Aussagekraft besitzt [Andre 1997]. Der mittlere Rillenabstand ( $S_m$ ) wurde als Maß für die Welligkeit aufgenommen.

Durch die metallographische Aufbereitung (Querschliff) kann auch ein visueller Eindruck der vertikalen Struktur einer Oberfläche erreicht werden, wobei deren eigentliche Bedeutung in

der Darstellung struktureller Veränderungen des Oberflächengefüges liegt (Darstellung von Mikrodefekten und Gleitbändern) [Schatt 1991].

Um einen eventuell vorliegenden Aufhärtungseffekt durch Kaltverfestigung an der Prüfkörperoberfläche nachweisen zu können, wurde die Mikrohärte nach Vickers bestimmt. Dabei erwiesen sich die Untersuchungen der Oberflächen im gegossenen und korundgestrahlten Zustand als wenig sinnvoll, da die Prüfeindrücke der Diamantpyramide in den Größenbereich der Oberflächenrauigkeit fielen und daher nicht auswertbar waren. Eine Veränderung der Prüflast wäre ebenfalls nicht geeignet, da ein bestehender Aufhärtungseffekt nur im Mikro- und nicht im Makrohärtebereich liegen würde. Die Mikrohärtemessungen wurden daher an den Querschliffen der Prüfkörper in regelmäßigen Abständen von der Oberfläche (10µm, 20µm, 50µm, 100µm, Prüfkörpermitte) vorgenommen. Der kleinste Abstand von der Oberfläche (10µm) konnte dabei nicht unterschritten werden, da anderenfalls die Gefahr besteht, nicht allein das zu prüfende Material, sondern ebenfalls die zur Einbettung dienende Epoxydharzmasse zu erfassen und so das Prüfergebnis zu verfälschen. Eine objektive Erfassung der Aufhärtung infolge Kaltverfestigung kann ebenfalls durch Härteunterschiede innerhalb des Gefüges (Gefügehärtete und Vielkristallhärtete, siehe Kap. 4.3.2.) überlagert werden, wodurch die Aussagekraft der Messergebnisse relativiert wird (infolge hoher Messwertstreuung) und in der Diskussion Beachtung finden muss.

Die Messung des Reflexionsvermögens (in Form der Glanzgraderfassung) stellt eine zusätzliche Information dar und diente zur Objektivierung der subjektiven Empfindung einer "glänzenden Oberfläche". Bei der Diskussion der Ergebnisse ist darauf zu achten, dass eine Erhöhung des Glanzgrades auch durch eine verstärkt gerichtete Reflexion erreicht wird. Daher besteht die Möglichkeit, dass durch Bearbeitung der vorgeschliffenen Oberfläche (SiC220, parallele Schleifspuren) die gerichtete in eine diffuse Reflexion umgewandelt wird, und somit trotz Glättungseffekt eine Verschlechterung des Glanzgrades resultieren kann.

Um die bei mechanisch-technologischen Prüfverfahren auftretenden Verfahrensfehler so gering wie möglich zu halten, wurde jede Prüfung (Mikrohärte, Reflexion, Rauigkeit) mehrfach (10 Einzelmessungen) und lokal unterschiedlich durchgeführt, so dass ein mittelwertiges Ergebnis erreicht werden konnte, welches den gesamten Prüfkörper repräsentiert. Die ermittelten Werte wurden durch den t-Test nach Student statistisch ausgewertet und verglichen.

## 6.2. Diskussion der Ergebnisse

Die Diskussion der Ergebnisse soll anhand der Materialgruppen geführt und entsprechend des laborüblichen Arbeitsablaufs unterteilt werden:

- Diskussion der Bearbeitung des Grundzustandes mit Micro-Finishing und Ecoclean
- Diskussion der Bearbeitung der vorgeschliffenen Oberfläche mit Micro-Finishing und Ecoclean.

Dabei stellt der "Grundzustand" den jeweiligen Ausgangszustand (Gusszustand in der Micro-Finishing Reihe und korundgestrahlter Zustand in der Ecoclean Reihe) vor Anwendung der Bearbeitungsverfahren dar. Die "vorgeschliffene Oberfläche" repräsentiert den Oberflächenzustand nach laboratoriumsüblichen Fräsen und Schleifen. Dabei entspricht die Körnung des 220er Nassschleifpapiers etwa der Ausarbeitung mit feinen Schleifkörpern (im Vergleich: Titan SiC220  $R_{ZD}=1,1-1,7\mu\text{m}$  [eigene Werte], Titan gefräst:  $R_{ZD}=2,3\mu\text{m}$  [Voss 2002]) und die des 600er sowie 1200er Nassschleifpapiers dem Endzustand der rotierenden Bearbeitung (z.B. mit silikatgebundenen Feinschleifkörpern) vor der Politur ( $R_{ZD}=0,9-1,2\mu\text{m}$ ).

### 6.2.1. Goldlegierung

#### 6.2.1.1. Grundzustand

Der ultraschallgereinigte **Gusszustand** der Goldlegierung weist deutliche Oberflächenstörungen in Form von Gussporen und verbliebenen Einbettmasseresten auf, die sich metrisch in einer erhöhten Rautiefe ( $R_z$ ) und im Querschliff als Buchten bis zu  $20\mu\text{m}$  Tiefe darstellen. In einer experimentellen Untersuchung von Herrmann [1978] wurde die Oberfläche von Goldgüssen in Abhängigkeit von Einbettmasse und Einbettungsverfahren untersucht. Die dabei erreichten Werte lagen für den Mittenrauwert bei  $R_a=1,2-1,94\mu\text{m}$  und für die maximale Rautiefe bei  $R_t=5,5-10\mu\text{m}$  und sind mit den Ergebnissen vorliegender Arbeit vergleichbar:  $R_a=1,83\mu\text{m}$ ,  $R_t=13,98\mu\text{m}$  (Tabelle A, Anhang).

Durch die Bearbeitung mit dem Strahlmittel 1 des **Micro-Finishing** erfolgt eine Reinigung der Oberfläche, bei der die Poren teilweise verschlossen aber auch angeschnitten werden. Die gemittelte Rautiefe wird nicht signifikant verändert, jedoch  $S_m$  erhöht (von  $47,9\mu\text{m}$  auf  $89,4\mu\text{m}$ ). Durch die kinetische Energie des auftreffenden Strahlmittels kommt es nach Tiller [1985] zu lokalen Aufschmelzungen und folglich zu Impaktierungen von Strahlkörnern in die Oberfläche. Diese Impaktierungen konnten anhand der Querschliffe des feingestrahlten Prüfkörpers nachgewiesen werden.

Die alleinige Bearbeitung mit dem Strahlmittel 2 erzielt eine deutliche Glättung und Einebnung der weichen Goldlegierung mit einer Verbesserung von Glanzgrad, gemittelter Rautiefe und mittlerem Rillenabstand ( $R_z=8,3\mu\text{m}$ ,  $S_m=72,2\mu\text{m}$ , Glanzgrad=45%). Die bildgebenden Verfahren bestätigten einen schmiedenden Effekt der Strahlkugeln, wodurch

Profilierhebungen plastisch verformt und Gussporen verschlossen werden. Dagegen konnte entgegen der in der Literatur vertretenen Meinung keine Aufhärtung durch Kaltverformung nachgewiesen werden. Kaiser [1993] und auch Scholtes [1993] geben eine Abhängigkeit der Verfestigung von der Ausgangshärte an, wobei sich die Oberflächenverfestigung um so stärker zeigt, je niedriger die Ausgangshärte ist. Die vorliegenden Ergebnisse der Mikrohärtemessungen weisen bei der Bearbeitung des Gusszustandes keine signifikante Härtesteigerung nach. Dies könnte an den Oberflächenstörungen im Ausgangszustand (tiefe Buchten und Gussporositäten), an geringem Strahldruck und kurzer Strahldauer sowie an hohen Streuungen der Messwerte infolge einer Vielkristallhärte liegen. Bei weiterführenden Mikrohärtemessungen an glatteren Gussobjekten sowie vorgeschliffenen Flächen und bei variierenden Strahlparametern könnte ein möglicher verfestigender Effekt des Kugelstrahlens an hochgoldhaltigen Legierungen erneut überprüft werden.

Die Bearbeitung der Gussoberfläche mit der Kombination beider Strahlmittel erzielt eine ungünstigere Oberfläche als die alleinige Kugelstrahlbehandlung (Abb. 93). Zwar sind Glanzgrad und mittlerer Rillenabstand im Vergleich zum Ausgangszustand erhöht, jedoch bleibt die gemittelte Rautiefe unverändert, und die Untersuchung der Querschliffe zeigte Strahlmittlrückstände, die durch die hämmernde Wirkung der Strahlkugeln in die Oberfläche eingeschmiedet wurden und somit eine Verunreinigung darstellen, die durch anschließende Politur nicht mehr behoben werden kann.

Somit ist für die Bearbeitung des gereinigten (und ggf. abgesäuerten) Gusszustandes der Goldlegierung die alleinige Anwendung der Strahlkugeln (shot peening) am günstigsten.

Bei der Beurteilung der mit herkömmlichen **Korund** ( $110\mu\text{m}$ ) gestrahlten Goldgussoberfläche (als Ausgangszustand der Ecoclean-Reihe) fällt eine regelmäßige, aber raue Oberfläche mit deutlichen und tiefen Schneidspuren des Korundes auf. Die metrischen Parameter ( $R_{\text{ZD}}=10,8\mu\text{m}$ ,  $S_{\text{m}}=39,7\mu\text{m}$ ) entsprechen denen des Gusszustandes. Ebenfalls sind durch die bildgebenden Verfahren Rückstände und Impaktionen von Strahlmittel und Einbettmasse nachzuweisen.

Wird diese raue Oberfläche mit dem Glanzbad II des **Ecoclean** bearbeitet, so tritt profilographisch eine signifikante Verbesserung auf ( $R_{\text{ZD}}=7,1\mu\text{m}$ ,  $S_{\text{m}}=113,2\mu\text{m}$ ), welche einen günstigeren Oberflächenzustand als nach alleiniger Kugelstrahlbehandlung vorgibt. Jedoch zeigen die Aufnahmen im Rasterelektronenmikroskop neben großflächigen ebenen Strukturen auch tiefe, kraterähnliche Reste der Schneidspuren, welche durch anschließende Polierverfahren schwer zu beherrschen sind.

Der Vergleich der Oberflächeneffekte von Micro-Finishing und Ecoclean auf die gegossene bzw. korundgestrahlte Goldlegierung lässt folgende Aussage zu: Die Ausgangszustände (gereinigter Guss und herkömmlich korundgestrahlt) sind in ihren profilographischen Ergebnissen gleichwertig (Abb.93). Wird der Gusszustand mit den Strahlkugeln bearbeitet, so sind die profilographischen Werte ( $R_{\text{ZD}}=8,3\mu\text{m}$ ,  $S_{\text{m}}=72,2\mu\text{m}$ ) nicht so günstig wie nach



Bearbeitung des korundgestrahlten Zustandes mit dem Glanzbad II ( $R_{ZD}=7,1\mu\text{m}$ ,  $S_m=113,2\mu\text{m}$ ). Das Ecoclean erzielt also an sich einen stärkeren Glättungseffekt. Betrachtet man aber die Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen, so zeigt sich nach der Kugelstrahlbehandlung eine homogene, glatte und ebene Oberfläche, während die Bearbeitung mit dem Glanzbad II vereinzelt tiefe Störstellen (in Form von Resten nicht eingeebneter Schneidspuren des vorhergehenden Strahlens) zurücklässt.

Für die Bearbeitung der gegossenen Goldoberfläche ist demzufolge nach Ultraschallreinigung oder Absäuern das "shot peening" zu empfehlen.

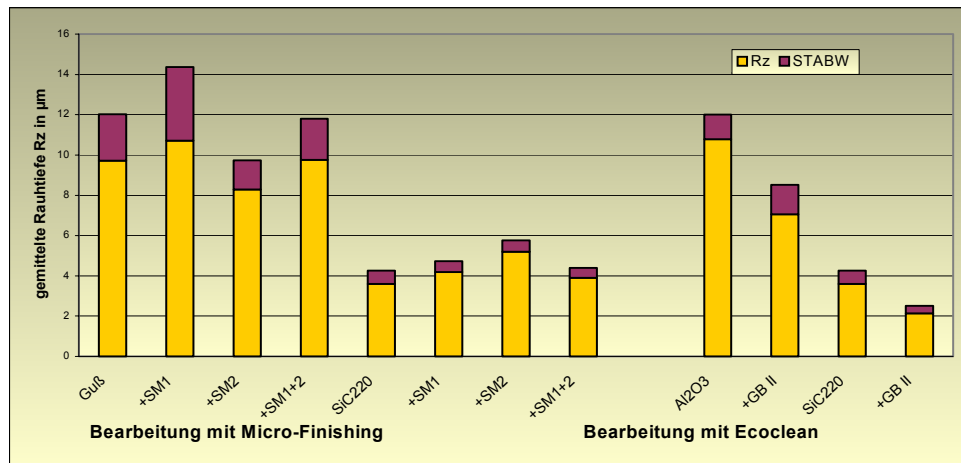


Abb. 93: Darstellung der gemittelten Rautiefe (vor und nach Bearbeitung mit Micro-Finishing und Ecoclean) des Grundzustandes und des mit SiC220 vorgeschliffenen Zustandes von Degudent H

#### 6.2.1.2. Vorgeschliffene Oberfläche

Die **vorgeschliffenen Oberflächen** der Goldlegierung weisen bearbeitungsspezifische Merkmale auf. Mit zunehmend feiner Körnung des Schleifpapiers ist ein Anstieg des Glanzgrades sowie eine Reduktion des mittleren Rillenabstandes und der gemittelten Rautiefe zu verzeichnen:

	$R_z [\mu\text{m}]$	$S_m [\mu\text{m}]$	Glanz [%]
SiC220	3,6	20,0	68
SiC600	1,3	16,6	65
SiC1200	0,9	13,7	77

Die Oberflächen zeigen parallele Schleifspuren, deren Abstand von der Körnung des verwendeten Papiers abhängig ist. Durch die Parallelität der Rillen kommt es zu einer gerichteten Lichtreflexion und demzufolge zu einem Anstieg des Glanzgrades.

Die Bearbeitung vorgeschliffener Oberflächen mit dem **Micro-Finishing** hat nachteilige Wirkung auf das Oberflächenprofil. Dies zeigt sich deutlich am Beispiel der mit Schleifpapier 220er Körnung vorgeschliffenen Oberfläche. Sowohl durch das abrasive Mikrostrahlen, das Kugelstrahlen als auch die kombinierte Anwendung beider Strahlmittel wird die Rautiefe erhöht (Abb. 93 und Tabelle A, Anhang), wobei das Ergebnisse nach Kombination von Strahlmittel 1 und Strahlmittel 2 dem Ausgangswert nahe kommt ( $R_z=3,9\mu\text{m}$ ). Zwar kann der mittlere Rillenabstand signifikant, aber nicht genug angehoben werden, um eine Erhöhung

der Rauigkeitswerte auszugleichen (SiC220+SM1+SM2:  $S_m=29,7\mu\text{m}$ ). Als Folge der Umwandlung der regelmäßigen, parallel geschliffenen Oberfläche in eine Oberfläche mit ungerichteten Bearbeitungsspuren kommt es zu einer diffusen Lichtreflexion und demzufolge zu einer Abnahme des Glanzgrades.

Schlussfolgernd aus diesen Ergebnissen ist das Mikrostrahlen von bereits mit rotierenden Instrumenten bearbeitete Goldlegierungen nicht zu empfehlen.

Wird die mit SiC-Papier 220er Körnung vorgeschliffene Goldoberfläche im Glanzbad II des **Ecoclean** weiter bearbeitet, so kommt es zu einer deutlichen Verbesserung der Oberflächengestalt. Sowohl Rauigkeit, Welligkeit als auch der Glanzgrad können positiv verändert werden. Die bildgebenden Untersuchungsverfahren zeigen eine starke Glättung und weite, ebene Flächen mit vereinzelt flachen Spuren der vorhergehenden Bearbeitung. Diese Defekte können gut durch eine nachfolgende Politur ausgeglichen werden. Da die Ergebnisse der Bearbeitung der feiner vorgeschliffenen Oberfläche (SiC600, SiC1200) nicht diese Charakteristik aufweisen, ist anzunehmen, dass die Anwendung des Glanzbades II nach einer manuellen Vorpolitur keine Verbesserung der Oberflächenqualität erzielt, während sich die Anwendung des Ecoclean auf die gefräste bzw. fein ausgearbeitete Oberfläche positiv auswirkt. Zudem wurde bei den Mikrohärteprüfungen an den Oberflächen der mit dem Ecoclean bearbeiteten Prüfkörper eine signifikante Aufhärtung festgestellt.

Aus dem Vergleich der Untersuchungsergebnisse beider Bearbeitungsverfahren kann angenommen werden, dass durch das Mikrokugelstrahlen der Gussoberflächen von Goldlegierungen und daran anschließende Bearbeitung im Glanzbad II des Ecoclean ein Optimum nicht manueller Oberflächenbearbeitung erreicht wird.

### 6.2.2. Kobaltbasislegierung

#### 6.2.2.1. Grundzustand

Der **Gusszustand** der Kobaltbasislegierung zeigt nach Ultraschallreinigung eine stark zerklüftete, raue Oberfläche mit aufgelagerten Einbettmasseresten. Die gemittelte Rautiefe ist entsprechend hoch:  $R_{ZD}=19,9\mu\text{m}$ .

Wird dieser Zustand mit dem abrasiven Strahlmittel des **Micro-Finishing** bearbeitet, so erfolgt eine Reinigung und Einebnung der Oberfläche. Die mittlere Rautiefe kann signifikant reduziert werden ( $R_z=5,7\mu\text{m}$ ), während der Glanzgrad und Rillenabstand in etwa gleich bleiben. In Untersuchungen zur Oberflächenrauigkeit von Lindigkeit und Müller [1984] sowie Taylor [1998] wurden für die feingestahlte [ $50\mu\text{m}$ ] Oberfläche einer Kobaltbasislegierung eine Mittenrauwert von  $R_a=1,0\mu\text{m}$  bzw.  $1,7\mu\text{m}$  und eine maximale Rautiefe von  $R_t=9,4\mu\text{m}$  bzw.  $13,4\mu\text{m}$  gemessen. Dies entspricht in vorliegender Untersuchung dem Strahlen mit dem abrasiven Strahlmittel:  $R_a=1,23\mu\text{m}$ ,  $R_t=7,64\mu\text{m}$ . Die bildgebenden Verfahren bestätigen eine gereinigte und gleichmäßig aufgeraute Struktur, die von kurzen scharfen Schneidspuren des Strahlkorns dominiert wird.

Die alleinige Anwendung des Kugelstrahlmittels erreicht zwar ebenfalls eine signifikante Verbesserung der Profilwerte (Abnahme der Rautiefe und deutliche Zunahme des Rillenabstandes, Abb.94 und Tabelle A im Anhang) und des Glanzgrades im Vergleich zum Grundzustand, jedoch zeigt sich das Profil rauer und aufgeworfener als nach abrasivem Strahlen. Die Qualität wie nach Anwendung des Strahlmittels 1 kann nicht erreicht werden. Erfolgt die Bearbeitung mit der Kombination beider Strahlmedien, so wird eine glatte, gleichmäßige und homogene Oberflächenstruktur erzielt, deren metrische Parameter am günstigsten sind:  $R_z=5,0\mu\text{m}$ ,  $S_m=108,8\mu\text{m}$ , Glanzgrad=59%. Zusätzlich konnte ein die Oberfläche aufhärtender Effekt der Strahlkugeln nachgewiesen werden, der bis in eine Tiefe von  $20\mu\text{m}$  reicht. Nach kombiniertem Strahlen wurde eine eindeutige Verbesserung der Oberflächenqualität erreicht; es entstand eine sehr glatte, verdichtete und homogene Oberfläche, die nur noch einer nachfolgenden Politur bedarf. Im Vergleich erzielten Lindigkeit und Müller [1984] durch manuelle Bearbeitung mit einem feinen Hartmetallfräser als letzte Stufe vor der Politur ähnliche Werte:

	$R_a [\mu\text{m}]$	$R_t [\mu\text{m}]$
fein bearbeitet [Lindigkeit]	0,8	6,4
eigene Werte	1,2	7,8

Der mit herkömmlichen **Korund** ( $110\mu\text{m}$ ) gestrahlte Ausgangszustand zeigt ebenfalls eine unebene, aufgeraute und zerklüftete Oberfläche, deren Profilwerte erwartungsgemäß ungünstiger als die nach Bestrahlen des Gusszustandes mittels Strahlmittel 1 (Micro-Finishing) sind:  $R_z[110\mu\text{m}]=7,7\mu\text{m}$ ,  $R_z[\text{SM1}]=5,7\mu\text{m}$ ,  $S_m[110\mu\text{m}]=34,7\mu\text{m}$ ,  $S_m[\text{SM1}]=60,8\mu\text{m}$ .

Wird dieser Zustand mit dem **Ecoclean**-Verfahren bearbeitet, so ist zwar nach Anwendung des Glanzbades I eine signifikante Reduktion der gemittelten Rautiefe sowie eine Erhöhung des mittleren Rillenabstandes und Glanzgrades zu verzeichnen, jedoch zeigen die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen einen nur geringfügigen Abtrag und großflächig unveränderte, tiefer liegende Strukturen, die durch nachfolgende Politur nur schwer ausgeglichen werden können. Auch die zusätzliche Anwendung des Glanzbades II erreicht keine Verbesserung. Sowohl in der bildgebenden Untersuchung, als auch durch die Erfassung der Profil- und Glanzwerte konnte kein relevanter Unterschied zwischen beiden Bearbeitungsstufen festgestellt werden.

Somit ist die alleinige Anwendung des Ecoclean-Verfahrens auf die korundgestrahlte Oberfläche von Kobaltbasislegierungen nicht zu empfehlen.

Bei dem Vergleich der Wirkung von Micro-Finishing und Ecoclean auf die gegossene bzw. mit herkömmlichen Strahlkorund gereinigte Oberfläche von Kobaltbasislegierungen ist eindeutig dem Micro-Finishing der Vorzug zu geben. Durch abrasives Mikrostrahlen kann die Oberfläche gleichmäßig eingeebnet werden. Das nachfolgende shot peening verdichtet und glättet die Oberfläche und führt zu einer optimal vorbereiteten Struktur für nachfolgendes Polieren (Abb. 94). Die alleinige Anwendung des Ecoclean dagegen führt zu keiner

befriedigenden Verbesserung der Oberflächenqualität, da zu starke Restdefekte verbleiben, die durch aufwändige Nachbearbeitungen ausgeglichen werden müssen und somit zu keiner Rationalisierung der Bearbeitung führen.

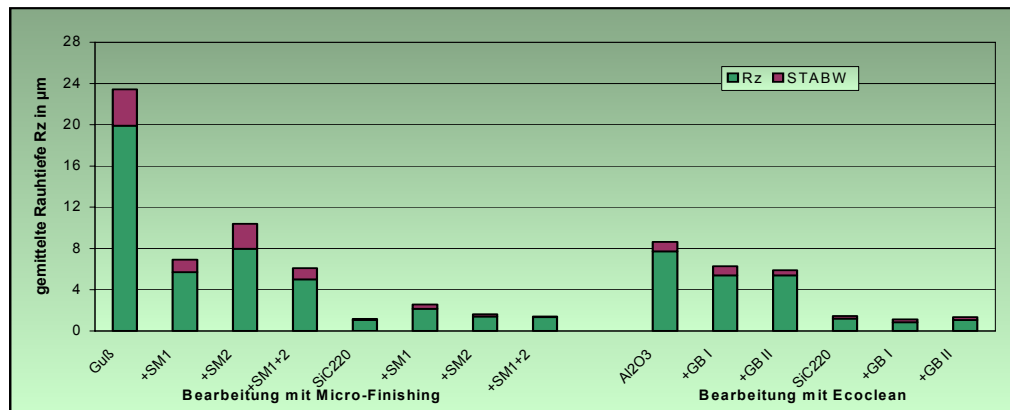


Abb. 94: Gemittelte Rautiefe (vor und nach Bearbeitung mit Micro-Finishing und Ecoclean) des Grundzustandes und des mit SiC220 vorgeschliffenen Zustandes von Remanium GM380

#### 6.2.2.2. Vorgeschliffene Oberfläche

Die Profilwerte der **vorgeschliffenen Prüfkörper** der Kobaltbasislegierung zeigen ähnlich wie bei der Goldlegierung die Abhängigkeit von der Körnung des Schleifmittels, wobei aufgrund der höheren Ausgangshärte geringere Rautiefen erreicht werden:

	R <sub>z</sub> [µm]	S <sub>m</sub> [µm]	Glanz [%]
SiC220	1,1	6,2	90,8
SiC600	0,6	22,4	89,8
SiC1200	1,0	10,0	88,0

Wird die mit SiC-Papier 220er Körnung vorgeschliffene Oberfläche mit dem **Micro-Finishing** bearbeitet, so kommt es durch das abrasive Strahlen zu einer signifikanten Aufrauung des Oberflächenprofils: die gemittelte Rautiefe erreicht Werte von  $R_z=2,2\mu\text{m}$  und der Glanzgrad nimmt ab (43,6%). Die alleinige Anwendung des Kugelstrahlmediums liefert bessere Rauigkeitswerte und einen günstigeren Glanzgrad; die Werte des Ausgangszustandes werden jedoch nicht erreicht. Werden abrasives und Kugelstrahlmedium in Kombination angewendet, so ist kein statistisch gesicherter Unterschied zur alleinigen Kugelstrahlbehandlung ( $R_z=1,3\mu\text{m}$ , Glanzgrad 61%) vorhanden. Bei der Auswertung der bildgebenden Untersuchungsverfahren stellte sich kein Unterschied zwischen der bearbeiteten Gussoberfläche und der Bearbeitung der vorgeschliffenen Oberfläche dar. Nach Anwendung des Strahlmittels 1 dominierten kurze scharfe Schneidspuren ohne erkennbare Reste des vorhergehenden Schliffes. Die Kombination beider Strahlmedien zeigt eine weitflächig geschmiedete Oberfläche, an der verbliebene Restdefekte (Schneidspuren des Strahlkornes) und vereinzelt Kugeleinschläge erkennbar sind. Die Kugelstrahlbearbeitung der feingeschliffenen Oberflächen (SiC600, SiC1200) zeigt ähnliche Resultate.

Die Oberflächenqualität nach Mikrostrahlen der vorgeschliffenen Kobaltbasislegierung erreicht zwar profilographisch günstigere Werte als die Oberfläche nach kombiniertem Strahlen der Gussoberfläche, jedoch ist im Vergleich zum Ausgangszustand keine Verbesserung erreicht worden (Abb. 94). Die Auswertung der bildgebenden Verfahren zeigt keine qualitativen Unterschiede zwischen der Bearbeitung des Gusszustandes und der vorgeschliffenen Oberfläche.

Werden die vorgeschliffenen Prüfkörper mit dem **Ecoclean** bearbeitet, so kommt es zwar zu einer Erhöhung des Glanzgrades (bei SiC220 von 82% auf 92% nach Glanzbad I), jedoch konnte bei der Profilanalyse kein statistisch gesicherter Unterschied der Rautiefen zwischen Ausgangszustand, Glanzbad I sowie Glanzbad I mit nachfolgendem Bad II festgestellt werden. Die gemittelte Rautiefe liegt in einem Bereich von  $R_z=0,9\mu\text{m}$  bis  $R_z=1,2\mu\text{m}$ . Auch in der lichtmikroskopischen Betrachtung zeigte sich kein deutlicher Unterschied zwischen Ausgangs- und Endzustand. Sowohl nach Bad I, als auch nach Glanzbad I und II dominieren die parallelen Schleifspuren des SiC-Papiers, wobei nach zusätzlichem Bad II vereinzelt leichte Nadeleinschläge zu erkennen sind. Auffällig war eine signifikante Aufhärtung der Oberfläche nach Anwendung des Glanzbades II (MHV[0,02] von 651 auf 766).

Schlussfolgernd zeigt sich die Wirkung des Ecoclean auf die vorgeschliffene Kobaltbasisoberfläche als nicht ausreichend, um eine Verbesserung der Oberflächenqualität zu erreichen, während sie aber auch keinen deutlich negativen Einfluss auf diese ausübt.

Bei dem Vergleich der Untersuchungsergebnisse der mit dem Micro-Finishing und Ecoclean bearbeiteten Kobaltbasislegierung fällt auf, dass ein positiver Effekt beider Verfahren bei Bearbeitung des Grundzustandes erreicht wird, wobei die Wirkung des Micro-Finishing deutlicher ist. Da der Ausgangszustand der Ecoclean Reihe (korundgestrahlt [ $110\mu\text{m}$ ]) günstigere Profilwerte als der Gusszustand aufweist und das Ecoclean auf die korundgestrahlte Oberfläche ebenfalls signifikant profilverbessernd wirkt, ist eine Kombination beider Verfahren überlegenswert. Bei der Bearbeitung der vorgeschliffenen Oberfläche hat sowohl das Micro-Finishing, als auch das Ecoclean-Verfahren eine nur geringe Wirkung auf die Oberflächenqualität.

### 6.2.3. Titan

#### 6.2.3.1. Grundzustand

Der **Gusszustand** des Titans nach Ultraschallreinigung zeigt eine sehr gleichmäßige und ebene Grundstruktur, die durch zahlreiche Auflagerungen charakterisiert ist. Diese bewirken eine erhöhte Rautiefe ( $R_z=10,7\mu\text{m}$ , vergleichbar mit den Werten des Gusszustandes der Goldlegierung, siehe Tabelle A im Anhang). In Untersuchungen zur Oberflächenbeschaffenheit von gegossenem Titan von Augthun et al. [1992] wurden ein Mittenrauwert  $R_a$  von  $5,3-23\mu\text{m}$  und eine maximale Rautiefe  $R_t$  von  $27,5-160,4\mu\text{m}$  gemessen. Dabei handelte es sich um Ergebnisse der Vermessung von sechs Prüfkörpern aus vergossenem Titan Grad 2 und einer Titanlegierung (TiAl6V4). Im Vergleich wurden in

vorliegender Arbeit am gegossenen Grundzustand Werte von  $R_a=2,1\mu\text{m}$  und  $R_t=16,5\mu\text{m}$  ermittelt.

Infolge der Reaktionsfreudigkeit des schmelzflüssigen Titans kommt es zu Grenzflächenreaktionen, z.B. mit Bestandteilen der Einbettmasse, und zur Aufnahme von Fremdelementen, die in der rasterelektronenmikroskopischen Darstellung als oben beschriebene Auflagerungen ersichtlich und mit einer Härtesteigerung verbunden sind ( $=\alpha$ -case). In Untersuchungen zur Randaufhärtung bzw. Ausdehnung der  $\alpha$ -case an Gussobjekten wurden von verschiedenen Autoren folgende Werte angegeben:

	$\alpha$ -case
Päßler et al. [1991]	50-300 $\mu\text{m}$
Augthun et al. [1992]	100-250 $\mu\text{m}$
Brauner [1992]	30-280 $\mu\text{m}$
Klapper und Gehre [1998]	100-130 $\mu\text{m}$
Lenz und Dietz [1995]	30-70 $\mu\text{m}$
Lenz und Lenz [2002]	30-80 $\mu\text{m}$ (Titanlegierung)

In den metallographischen Aufarbeitungen vorliegender Arbeit wurden durch spezielle Farbätzung mit Sauerstoff angereicherte Bereiche weiß dargestellt. Durch Vermessung dieser Zone und die Auswertung der Mikrohärtemessungen am Gusszustand konnte eine aufgehärtete und mit Sauerstoff angereicherte Zone ( $\alpha$ -case) bis in eine Tiefe von 40-50 $\mu\text{m}$  festgestellt werden.

Wird der Gusszustand mit dem mikrokristallinen Strahlmittel 1 des **Micro-Finishing** bearbeitet, so resultiert eine signifikante Reduktion der Rautiefe auf etwa die Hälfte ( $R_z=5,9\mu\text{m}$ ), eine Vergrößerung des mittleren Rillenabstandes und eine geringe Erhöhung des Glanzgrades. Die bildgebenden Untersuchungsverfahren zeigen eine gleichmäßig strukturierte Oberfläche mit kleinflächigen und flachen Schneidspuren. Durch die abrasive Reinigung konnten Fremdauflagerungen (Reste der Einbettmasse) entfernt sowie die  $\alpha$ -case reduziert werden. Dies kann durch die metallographische Darstellung verdeutlicht sowie durch die signifikante Abnahme der Mikrohärte nachgewiesen werden (siehe Tabelle B, Anhang).

Nach alleiniger Anwendung der Mikrostrahlkugeln zeigt sich eine deutlich geglättete Oberfläche, deren Rauigkeit nicht jene nach Anwendung des Strahlmittels 1 erreicht ( $R_z=7\mu\text{m}$ ), aber einen besonders hohen Rillenabstand aufweist ( $S_m=117,6\mu\text{m}$ ). Die Struktur der Oberfläche macht einen geschmiedeten Eindruck, wobei Profilerhebungen scheinbar umgeklappt wurden und es zu vereinzelt Impaktionen von Strahlkugeln kommt. Die kugelgestrahlte Oberfläche erscheint im Querschliff ebener und glatter als es die gemittelte Rautiefe anzeigt; aber es ist anzunehmen, dass die gemittelten Werte durch hohe Einzelwerte (hoher  $R_t$ , siehe Tabelle A im Anhang) beeinflusst wurden. Diese erhöhten Einzelmesswerte sind durch nicht vollständig zugeschmiedete Restdefekte der

Gussoberfläche zu erklären. In der metallographischen Darstellung ist ebenfalls zu erkennen, dass die oberflächliche Reaktionsschicht nicht ausreichend reduziert werden konnte, die verbliebene mit Sauerstoff angereicherte Schicht reicht bis in eine Tiefe von etwa  $30\mu\text{m}$ .

Die beste Oberflächenqualität ergibt sich aus der Kombination beider Strahlmittel des Micro-Finishing (Abb. 95). Durch die abrasive Komponente kann die Oberfläche gereinigt und die gussbedingte Reaktionsschicht reduziert werden. Nachfolgendes Kugelstrahlen schmiedet und verdichtet die Oberfläche, so dass ein glattes Oberflächenprofil ohne Spuren des vorangegangenen abrasiven Strahlens entsteht. Die relativ hohe gemittelte Rautiefe von  $R_z=6,8\mu\text{m}$  (ähnlich jener nach alleinigem Kugelstrahlen) ist dabei durch hohe Einzelrautiefen bedingt ( $R_t=12,1\mu\text{m}$ ). Die weitestgehend glatte Oberfläche wird durch einen günstigen Mittenrauwert von  $R_a=1,7\mu\text{m}$  verdeutlicht. Sowohl mittlerer Rillenabstand als auch Glanzgrad sind im Vergleich zum Ausgangszustand erhöht. Ein aufhärtender Effekt der Strahlkugeln konnte aufgrund der verbliebenen  $\alpha$ -case nicht festgestellt werden. Die gussbedingte oberflächliche Aufhärtung stellt eine Schutzschicht dar, so dass es durch den Einfluss der Strahlkugeln nicht zu möglichen mikrokristallinen Störungen des Gefüges kam.

Die mit herkömmlichen **Korund** gestrahlte Titanoberfläche zeigt eine sehr grobe und aufgeworfene Struktur mit tiefen Schneidspuren des Strahlkorns. Die schützende  $\alpha$ -case wird komplett entfernt, so dass es durch plastische Verformungen zu deutlichen Gefügestörungen in Form von Gleitbändern kommt, die bis in eine Tiefe von  $20\text{--}30\mu\text{m}$  reichen. Die gemittelte Rautiefe liegt bei  $R_z=7,7\mu\text{m}$  und somit über jener nach Strahlen mit feinkristallinem Strahlmittel (SM1).

Wird dieser Zustand im Bad I des **Ecoclean** bearbeitet, so resultiert eine im Bild deutliche Glättung. Die Oberflächenstruktur erscheint verwaschen und abgerundet, nicht mehr aufgeworfen und scharfkantig wie im Ausgangszustand. Die Profilwerte zeigen keine Signifikanzen, die Rautiefe konnte auf  $R_z=6,4\mu\text{m}$  reduziert und der Rillenabstand von  $S_m=35,4\mu\text{m}$  auf  $S_m=38,4\mu\text{m}$  erhöht werden. Auch hier wird die gemittelte Rautiefe von hohen Einzelwerten beeinflusst (siehe Tabelle C, Anhang). Besonders auffällig ist aber das vollständige Fehlen von Gleitbändern. Demzufolge muss eine relativ starke Oberflächenschicht durch die Bearbeitung im Ecoclean abgetragen worden sein. Dies erfolgte nicht mechanisch, wie durch das abrasive Strahlen, sondern vorwiegend chemisch durch den Gehalt von Natriumfluorid im Bad I des Ecoclean. Das chemische Verhalten von Titan wird von Rüdinger [1983] in Schwefelsäure, Salzsäure, Phosphorsäure, Oxalsäure und Ameisensäure als begrenzt beständig und in trockenem Chlor-Gas, roter rauchender Salpetersäure und in Fluoriden als unbeständig angegeben. Somit löst das Bad I die oberflächlichen Schichten des gestrahlten Titans auf. Eine Bestätigung dieser Annahme wird durch die Bestimmung des Masseabtrages geliefert (siehe Abbildung D, Anhang). Zur Ermittlung des Masseabtrages wurden die Prüfkörper vor und nach der jeweiligen

Bearbeitung und nach Trocknen im Vakuum gewogen und die Gewichts Differenz auf die Prüfkörperoberfläche umgerechnet. In der Ergebnisdarstellung des Masseabtrages zeigte sich eindeutig ein abtragender Effekt des Ecoclean beim Titan. Es waren Massenverluste (durch Bad I und Bad I+II) von 4-20 mg/cm<sup>2</sup> zu verzeichnen.

Die zusätzliche Anwendung des Glanzbades II bewirkt eine weitere Glättung, die signifikant zum Ausgangszustand ist ( $R_z=5,4\mu\text{m}$ ,  $S_m=63\mu\text{m}$ ). Das Lichtreflexionsvermögen erreicht einen Wert von 69%. Die Oberfläche kann weitestgehend geglättet werden, es erscheinen nur leichte Eindrücke der Nadeln. Im metallographischen Bild ist die mit Sauerstoff angereicherte oberflächennahe Zone nahezu entfernt.

Im Ergebnis stellt sich der Effekt des Ecoclean auf die korundgestrahlte Oberfläche positiv dar. Gemittelte Rautiefe und Glanzgrad sind günstiger als nach Anwendung des Micro-Finishing (Abb. 95). Jedoch wird bei Anwendung des Mikrostrahlens eine langwelligere Oberfläche erzielt, die eine verdichtete und leicht aufgehärtete Sauerstoffdiffusionszone aufweist. Diese erscheint als funktionelle Oberflächenschicht sinnvoll. Demgegenüber hinterlässt das Ecoclean-Verfahren zwar eine von Fremdelementen "gereinigte" Oberfläche, der Masseverlust erscheint jedoch aus der Sicht der Präzision der Therapiemittel kritisch; auch könnte die durch den chemischen Beizvorgang freigelegte Oberfläche sich nachteilig auf die Passivierung auswirken. Somit ist für die Bearbeitung des Grundzustandes des Titans die Anwendung des Micro-Finishing zu empfehlen, da hier die  $\alpha$ -case kontrollierter (besser kontrollierbarer Strahldruck und Strahldauer) reduziert werden kann, während die Bearbeitungsparameter bei Anwendung des Ecoclean nur bedingt frei gewählt werden können. Überlegenswert ist die Kombination des feinkristallinen Strahlmittel 1 (zur Reinigung und Reduktion der  $\alpha$ -case) mit der nachfolgenden Anwendung des Glanzbades II (nicht-invasive Bearbeitung, da kein Zusatz von Fluoriden) bzw. die Anwendung des Glanzbades II nach Einsatz beider Strahlmittel des Micro-Finishing. Diese Kombinationen sollten in weiterführenden Studien experimentell untersucht werden.

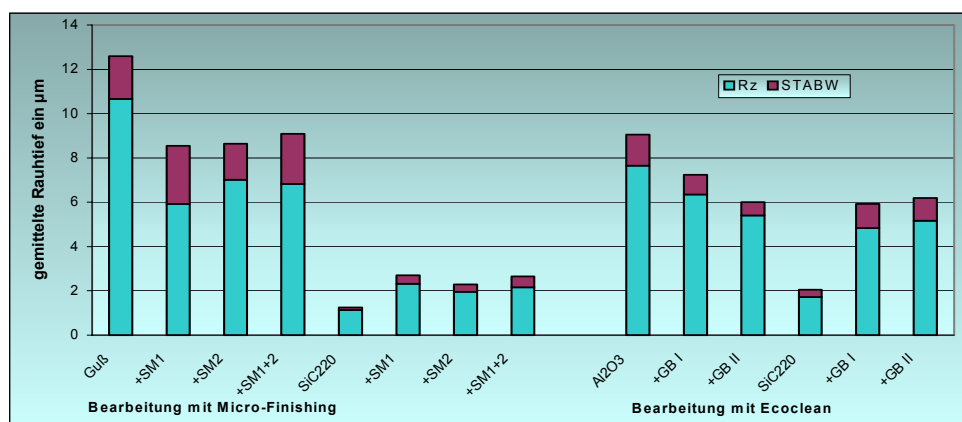


Abb. 95: Gemittelten Rautiefe (vor und nach Bearbeitung mit Micro-Finishing und Ecoclean) des Grundzustandes und des mit SiC220 vorgeschliffenen Zustandes von Biotan



### 6.2.3.2. Vorgeschliffene Oberfläche

Die Oberfläche der **vorgeschliffenen** Titanprüfkörper weist wie bei den anderen untersuchten Materialien ein gleichmäßiges Rillenprofil auf. Die mittleren Messwerte entsprechen weitestgehend denen der Kobaltbasislegierung:

	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$S_m$ [ $\mu\text{m}$ ]	Glanz [%]
SiC220	1,1	13,9	87,6
SiC600	1,1	16,5	89,6
SiC1200	0,9	15,6	87,6

Die Querschliffe der vorgeschliffenen Prüfkörper zeigen im Ausgangszustand eine gleichmäßig aufgeraute Oberfläche und einen vollständigen Abtrag der  $\alpha$ -case ohne Störungen der Kristallstruktur.

Werden die vorgeschliffenen Prüfkörper mit dem **Micro-Finishing** bearbeitet, so kann zwar der mittlere Rillenabstand signifikant erhöht werden, jedoch wird das Profil ebenfalls aufgeraut (siehe Tabelle A, Anhang). Die gemittelten Rautiefen steigen auf etwa das Doppelte des Ausgangswertes an. Dabei liegen sowohl die Endrauigkeiten als auch der resultierende mittlere Rillenabstand und Glanzgrad in ähnlichen Bereichen zwischen  $R_z=2,1\mu\text{m}$  bis  $2,4\mu\text{m}$ ,  $S_m=36,8\mu\text{m}$  bis  $41,4\mu\text{m}$  und Glanzgrad zwischen 47 und 53 %. Die mit SiC-Papier 220er Körnung vorgeschliffene und im Anschluss mit dem abrasiven Strahlmittel bearbeitete Oberfläche weist die gleiche Morphologie auf, wie nach Bearbeitung des Gusszustandes. Es sind keine Spuren des Feinschliffes mehr zu erkennen. Nach zusätzlichem Kugelstrahlen zeigt sich eine sehr glatte, geschmiedete Oberfläche mit nur wenig verbliebenen Defektstellen und vereinzelt Kugeleinschlägen. Die Anwendung der Strahlkugeln bewirkt zudem eine Kaltverfestigung (nachweisbarer Anstieg der Mikrohärtigkeit bis in teilweise  $50\mu\text{m}$  Tiefe, siehe Tabelle B, Anhang). Als Nachteil sind jedoch die im metallographischen Schliffbild erkennbaren Gefügeverspannungen in Form von Gleitbändern, die bis in eine Tiefe von  $30\mu\text{m}$  reichen, und die Impaktionen von Strahlkugeln in der Randschicht zu werten.

Nach Anwendung des **Ecoclean** auf die vorgeschliffene Oberfläche zeigt sich ebenfalls eine deutliche Aufrauung, die bei der mit 220er Schleifpapier vorbehandelten Oberfläche sogar einen Anstieg der gemittelten Rautiefe auf das dreifache des Ausgangswertes bewirkt ( $R_z[220]=1,7\mu\text{m}$ ,  $R_z[220+GBI]=4,8\mu\text{m}$ ,  $R_z[220+GBI+II]=5,2\mu\text{m}$ ). Dieser Anstieg ergab sich im wesentlichen durch Anwendung des beizenden Bades I. Die bildgebenden Untersuchungen zeigen eine glatte, wellige Oberfläche mit abgerundetem Charakter. Bei alleiniger Anwendung des Glanzbades II auf die feingeschliffene Oberfläche (SiC600, SiC1200) ist ein geringer Effekt zu erkennen, der sich in einem nicht signifikanten Anstieg der Rauigkeit sowie einer gewissen Erhöhung des Rillenabstandes und Glanzgrades äußert. In der Mikrofotografie waren leichte Eindrücke der Nadeln zu erkennen. Somit zeigt die

Anwendung des reinigenden Bades II auf die vorgeschliffene Titanoberfläche kaum Wirkung, während sich die Bearbeitung mittels Beizbad I als deutlich negativ äußert.

Beim Vergleich der Wirkung beider Bearbeitungsverfahren auf Titanoberflächen ergeben sich Widersprüche. Die beizende Wirkung des Bades I des Ecoclean ist sehr invasiv und hinterlässt sowohl bei der Bearbeitung des herkömmlich korundgestrahlten, als auch des vorgeschliffenen Zustandes ähnliche Rauheitsparameter (Abb.95). Dadurch wirkt es sich im einen Fall günstig, im anderen ungünstig auf die Oberflächengeometrie aus. Infolge des unkontrollierbaren Masseverlustes bei Bearbeitung mit dem Beizbad I bestehen jedoch Zweifel am Erhalt der bei Titan sonst so hervorragenden Passfähigkeit der Gussobjekte. Das Glanzbad II dagegen scheint nicht die nötige kinetische Energie aufzubringen, um eine signifikante Änderung der Oberflächenmorphologie zu erzeugen. Es ist daher in seiner Wirkung als nicht effektiv zu bezeichnen.

Beim Bearbeiten der gegossenen Titanoberfläche mit dem Micro-Finishing erweist sich wie oben erwähnt die Kombination aus Mikrostrahlen und Micropeening als am effektivsten. Die Morphologie nach dem Mikrostrahlen der vorgeschliffenen Oberfläche zeigt sich (trotz erhöhter Rauigkeit gegenüber dem Ausgangszustand) ebenfalls als günstig, wobei sich vor allem durch das Kugelstrahlen eine Verfestigung der Oberfläche – allerdings mit Gefügeverspannungen und Gleitbändern in der Randschicht – ergab. Ob diese kristallinen Störungen eine klinische Relevanz haben oder durch die nachweisbare Kaltverfestigung der Oberfläche an Bedeutung verlieren, müsste in weiterführenden Untersuchungen geklärt werden.

### 6.3. Klinische und technologische Relevanz

In vorliegender experimenteller Arbeit wurde die Auswirkung zweier nicht manueller Bearbeitungsverfahren auf die Oberflächen dreier metallischer Dentalmaterialien untersucht. Fasst man die Untersuchungsergebnisse und deren Auswertung zusammen, so ergeben sich folgende Empfehlungen für die praktische Anwendung:

- **hochgoldhaltige Legierungen** sollten nach dem Guss nicht durch abrasives Abstrahlen, sondern durch Ultraschallreinigung bzw. Absäuern von Einbettmasseresten gereinigt werden. Im Anschluss empfiehlt sich das shot peening mit feinkörnigen Strahlkugeln bei einem Druck von 2-3 bar. Diese bewirken eine glatte, geschmiedete Oberfläche mit nur vereinzelten Defektstellen, die durch nachfolgendes Polieren oder eventuell der Anwendung des Glanzbades II des Ecoclean beherrscht werden können. Bereits vorgeschliffene (gefräste) Goldoberflächen sollten nicht mehr gestrahlt werden, jedoch erweist sich die Anwendung des Ecoclean Bad II als günstig. Nach abschließender Hochglanzpolitur steht eine quantitativ und qualitativ hochwertige Oberfläche für den klinischen Einsatz bereit, die durch eine rationelle und effektive Bearbeitungskaskade hergestellt werden konnte (Abb. 96).

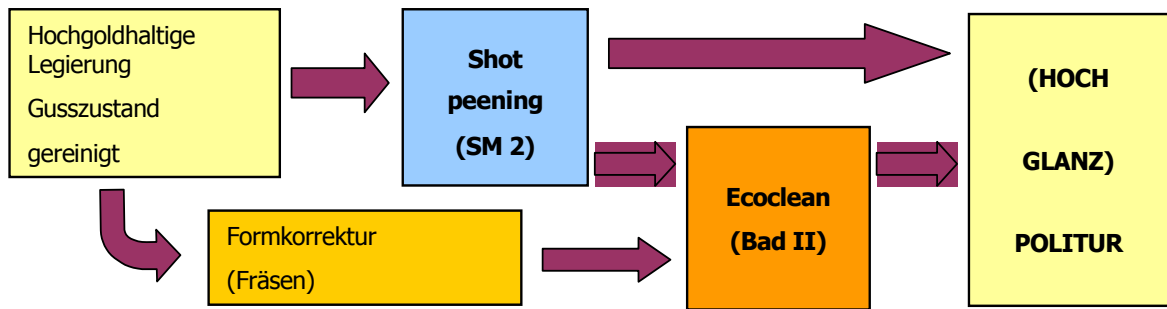


Abb. 96: Schematische Darstellung der Bearbeitungsempfehlungen für hochgoldhaltige Legierungen

- **Kobaltbasislegierungen** müssen zum Reinigen von der Einbettmasse und Entfernen der Gushaut abgestrahlt werden. Dafür empfehlen sich feinkristalline Strahlmittel (50µm), da diese eine bessere Oberflächenqualität erzielen als das herkömmliche Korund mit einer Körnung von 110µm. Durch nachfolgendes Mikrokugelstrahlen wird die Oberfläche weiter geglättet und verdichtet und erhält eine optimale Qualität für die anschließende (Hochglanz)Politur. Wenn Formkorrekturen durch grobes Fräsen vorgenommen werden, kann die Oberfläche im Anschluss mit Strahlkugeln bearbeitet werden, was ein Schmieden bzw. eine Verdichtung der Oberfläche bewirkt. Alternativ ist die Anwendung des Ecoclean-Verfahrens auf die grob ausgearbeitete Oberfläche möglich, wobei eine strukturverbessernde Wirkung nicht ausgeschlossen ist. Die Bearbeitung der fein ausgearbeiteten Oberfläche sowohl mit dem Micro-Finishing, als auch dem Ecoclean-Verfahren ist nicht zu empfehlen.

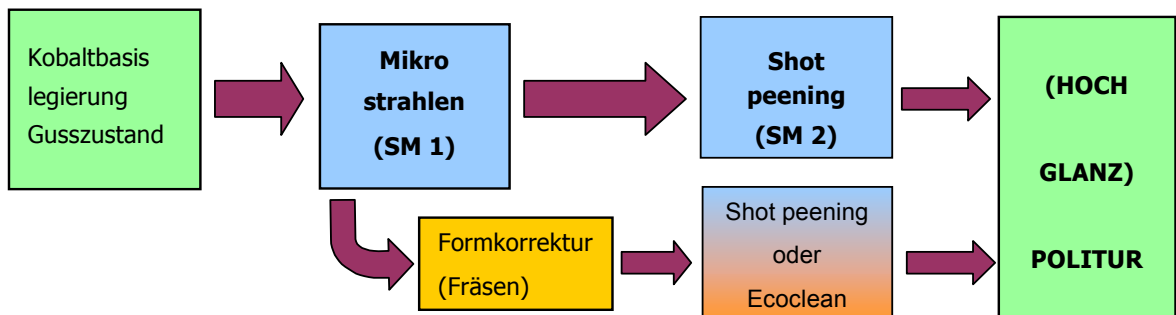


Abb. 97: Schematische Darstellung der Bearbeitungsempfehlungen für Kobaltbasislegierungen

- Gussobjekte aus **Titan** erfordern ein abrasives Abstrahlen, um aufgesinterte Fremdstoffe zu entfernen und die Sauerstoffdiffusionsschicht ( $\alpha$ -case) zu reduzieren. Das abrasive Mikrostrahlen stellt ein wirksames und materialschonendes "Reinigungsstrahlen" dar; die harte Reaktionsschicht wird verringert und eingeebnet. Durch anschließendes Mikrokugelstrahlen erfolgt eine deutliche Glättung der verbliebenen Restreaktionsschicht ohne Deformation des tieferliegenden Gefüges. Es wird ein günstiger Ausgangszustand für die Feinbearbeitung mit rotierenden Instrumenten und die Glanzpolitur erreicht. Mikrokugelstrahlen ausgearbeiteter/grob gefräster Titanoberflächen führt zu einer Verdichtung der Oberfläche bei gleichzeitig mäßiger Zunahme der Rauigkeit. Die

oberflächlichen Gefügestrukturen werden kaltverfestigt, die Oberflächenhärte erhöht. Dieser materialverbessernde Effekt geht jedoch mit Gefügestörungen der Randschichten (Gleitbänder) einher, deren klinische Relevanz nicht geklärt ist.

Mikrokugelstrahlen feingeschliffener/vorpolierter Titanoberflächen ist nicht sinnvoll. Ebenfalls kann das Ecoclean-Verfahren (insbesondere das Beizbad I) nicht zur Bearbeitung von Titan empfohlen werden, wobei dem Reinigungsbad II kein negativer Einfluss nachgewiesen werden konnte.

Durch sinnvolle Integration des Micro-Finishing in den Ablauf der Oberflächenbearbeitung von Titangüssen wird der Arbeits- und Zeitaufwand verringert und eine verbesserte Oberflächenqualität erzielt.

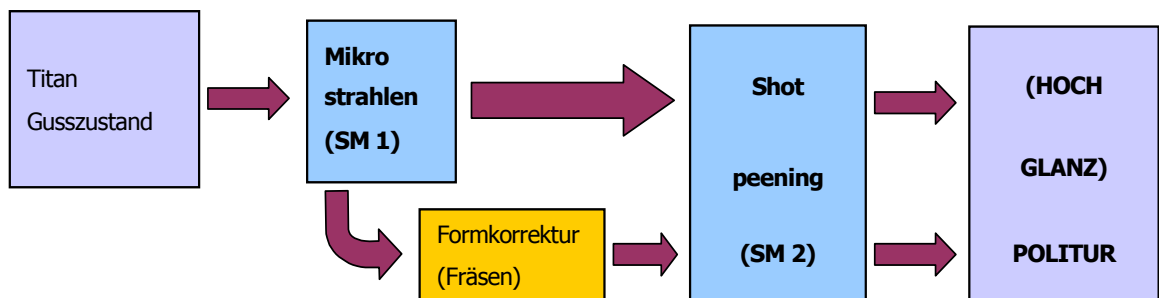


Abb. 98: Schematische Darstellung der Bearbeitungsempfehlungen für Titan

## 7. ZUSAMMENFASSUNG

Dem Ziel vorliegender experimenteller Arbeit entsprechend, sollten zwei alternative, nicht manuelle Bearbeitungsverfahren in ihrer Auswirkung auf den Oberflächenzustand und die Mikrostruktur metallischer Dentalmaterialien untersucht werden. Die dafür ausgewählten Materialien entsprechen den üblichen in der dentalen Technologie verwendeten Materialgruppen: eine hochgoldhaltige, aufbrennfähige Legierung, eine Kobaltbasislegierung und Titan. Um die Effektivität der untersuchten Bearbeitungsverfahren beurteilen zu können, wurden den Prüfkörpern unterschiedliche Oberflächenzustände zu Grunde gelegt, die verschiedene Phasen des laborüblichen Arbeitens simulieren sollten. Diese wurden in verschiedenen Stufen mit dem Mikro-Trockenstrahlverfahren Micro-Finishing und dem magnet-abrasiven Nassverfahren Ecoclean bearbeitet. Zur Beurteilung des Oberflächenzustandes wurden messtechnische und bildgebende Untersuchungsverfahren kombiniert. Durch profilographische Untersuchungen, Mikrohärteprüfungen an Querschliffen und Bestimmung des Lichtreflexionsvermögens sowie lichtmikroskopische Auswertung, Untersuchung im Rasterelektronenmikroskop und metallographische Beurteilung der ungeätzten (Goldlegierung, Kobaltbasislegierung) und geätzten (Titan) Querschliffe konnten Oberflächengeometrie und Oberflächenbeschaffenheit objektiv bewertet und verglichen werden.

Die Charakterisierung des Mikro-Trockenstrahlverfahrens **Micro-Finishing** stellt sich folgendermaßen dar: durch das abrasive Mikrostrahlen erfolgt ein schonender aber effektiver Abtrag oberflächlicher Schichten ohne Störungen der Kristallstruktur. Es resultiert eine gleichmäßig strukturierte Oberfläche, die eine gute Grundlage für nachfolgendes Bearbeiten bietet. Das Kugelstrahlen (Micropeening) bewirkt plastische Verformungen oberflächlicher Schichten ohne Materialabtrag. Die mit den Strahlkugeln bearbeiteten Oberflächen zeichnen sich durch eine Verdichtung und eine glatte, geschmiedete Struktur aus. Es kann zu Gefügestörungen in Form von Gleitbändern kommen. Die materialspezifischen Schlussfolgerungen ergeben für

- **hochgoldhaltige Legierungen** bei der Bearbeitung der Gussoberfläche einen negativen Einfluss des abrasiven Mikrostrahlens. Empfehlenswert ist das Strahlen der gereinigten Oberfläche mit Kugeln bei geringem Druck. Bereits gefräste Oberflächen sollten ebenfalls nicht mehr mit dem Micro-Finishing bearbeitet werden.
- **Kobaltbasislegierungen** müssen nach dem Guss durch Strahlen gereinigt werden. Hier empfiehlt sich das feinkristalline Strahlen mit nachfolgender Verdichtung und Glättung durch das Micropeening. Gefräste Oberflächen können durch Micropeening bearbeitet werden, wobei der Effekt nicht so deutlich wie nach Bearbeitung der Gussoberfläche ist.
- **Titan** benötigt schonend abrasives Strahlen zur Reduktion der  $\alpha$ -case. Auch hier bewirkt nachfolgendes Kugelstrahlen eine geglättete und homogene Oberfläche, die für

anschließendes Feinausarbeiten und Polieren optimal vorbereitet ist. Gefräste Oberflächen sollten vor der Endausarbeitung durch Micropeening bearbeitet werden, um eine Verdichtung und Aufhärtung der Oberfläche zu bewirken. Mögliche mikrokristalline Störungen sind in ihrer klinischen Auswirkung schwer einzuschätzen.

Demgegenüber zeigt das magnet-abrasive Nassverfahren **Ecoclean** eine geringere Effektivität und stärkere Materialabhängigkeit bei der Bearbeitung metallischer Dentalwerkstoffe:

- **Hochgoldhaltige Legierungen** sollen nur mit dem Glanzbad II bearbeitet werden, welches insbesondere auf die grob vorgeschliffene Oberfläche einen positiven Effekt ausübt. Bei fein ausgearbeiteten Oberflächen ist die Anwendung des Ecoclean nicht zu empfehlen.
- Das Ecoclean-Verfahren hat auf **Kobaltbasislegierungen** den geringsten Einfluss. Bei Anwendung auf die korundgestrahlte Oberfläche ist ein positiver, aber zu geringer Effekt zu verzeichnen um Schritte des laborüblichen Arbeitens ersetzen zu können.
- Das aggressive Beizbad I hat infolge seiner Fluoridanteile seine stärkste Wirkung auf **Titan**, wobei es einen deutlichen und unkontrollierten Materialabtrag bewirkt. Das Glanzbad II dagegen erzielt nur einen geringen Effekt, wodurch es sich bestenfalls zur zusätzlichen Anwendung empfehlen lässt (Reinigungs- oder Glanzbad).

In der Gesamtwertung lässt sich feststellen, dass durch die materialspezifische Anwendung des Micro-Finishing eine effektive und zeitsparende Möglichkeit gegeben ist, bei metallischen Dentalwerkstoffen durch nichtmanuelle Verfahren der Oberflächenbearbeitung reproduzierbare und qualitativ hochwertige Oberflächenstrukturen zu erreichen.

Durch die geringere Wirksamkeit des Ecoclean kann dieses nur als Ergänzung der herkömmlichen Oberflächenbearbeitung empfohlen werden. Lediglich bei der Anwendung auf hochgoldhaltige Legierungen kann eine Einschränkung der manuellen, rotierenden Bearbeitung auf die Vor- und Hochglanzpolitur erfolgen.

**LITERATUR**

1. ANDRE, M.; SCHWARZE, T.; GRÜNAY, H.; GUERTSEN, W.:  
Untersuchungen zur Fräsbarkeit und Polierbarkeit von gegossenem unlegierten Titan.  
Dtsch Zahnärztl Z 52 (1997), 215-218
2. ANONYMUS:  
Strahlspanen und Druckstrahlen (1 und 2).  
Metalloberfläche 37 (1983), 330-333; 389-392
3. APARICIO, C.; GIL, F.J.; RODRIGUEZ, D.; FONSECA, C.; BARBOSA, M.; PLANELL, J.A.:  
Corrosion Behavior of Titanium Implants Treated By Shot Peening.  
Abstracts of 4th Int. Symposium of Titanium in Dentistry, Geneva 1998
4. AUGTHUN, M; SCHÄDLICH-STUBENRAUCH, J; SAHM, P.R.:  
Untersuchungen zur Oberflächenbeschaffenheit von gegossenem Titan.  
Dtsch Zahnärztl Z 47 (1992), 505-507
5. AYDIN, A.K.:  
Evaluation of finishing and polishing techniques on surface roughness of chromium-cobalt castings.  
J Prosthet Dent 65 (1991), 763-767
6. BENNINGHOFF, H.:  
Stahlmittel.  
Metalloberfläche 37 (1983), 335-338
7. BERNHEYER, H.:  
Technisch-ökonomische Untersuchungen zum Verfahren "Strahl-Läppen".  
Dissertation, Technische Hochschule Dresden, 1960
8. BLUMENAUER, H.:  
Werkstoffprüfung.  
Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1994
9. BOLLEN, C. M. L.; PAPAIOANNOU, W.; VAN ELDERE, J.; SCHEPERS, E.; QUIRYEN, M.;  
VAN STEENBERGHE, D.:  
The influence of abutment surface roughness on plaque accumulation and peri-  
implant mucositis.  
Clin Oral Impl Res 7 (1996), 201-211
10. BOLLEN, C.:  
Comparison of surface roughness of oral hard materials to the threshold surface roughness  
for bacterial plaque retention: A review of the literature.  
Dent Mater 13 (1997), 258-269
11. BORMANN, M.:  
Strahltechnik - nicht nur als Vorbehandlung.  
Metalloberfläche 36 (1982), 319-321
12. BRÄMER, W.:  
Oberflächenbehandlung von Metallgerüsten durch Abstrahlen.  
dental labor 43 (1995), 215-217

13. BRAUNER, H.:  
Zur Randschichtaufhärtung an Titanwerkstoffen durch unterschiedliche Formstoffe  
und Einbettmassen.  
Dtsch Zahnärztl Z 47 (1992), 511-515
14. BUDTZ-JØRGENSEN, E.:  
Zur Ätiologie, Differentialdiagnose und Behandlung der Stomatitis prothetica (I und II).  
Quintessenz 30 (1979), 10, 145-152; 11, 123-127
15. CAVALLI-SFORZA, L.:  
Biometrie - Grundzüge biologisch-medizinischer Statistik.  
Gustav Fischer Verlag, Jena 1969
16. CHOMITSCH, N.:  
Magnet-abrasive Bearbeitung von Drahtoberflächen.  
Metalloberfläche 49 (1995), 936
17. DARVELL, B.W.; SAMMANT, N.; LUK, W.K.; CLARK, R. K. F.; TIDEMAN, H.:  
Contamination of titanium castings by aluminium oxide blasting.  
J Dent 23 (1995), 319-322
18. DEUTSCHER BUNDESTAG:  
Das Gesetz über Medizinprodukte.  
Deutsches Institut für Normung: DIN-Taschenbuch 267. Beuth Verlag, Berlin 1997
19. DICKORE, G.:  
Kugelstrahlen-Sandstrahlen-Druckstrahl-Läppen.  
Industrieblatt (1954), 130-131; 254-255
20. DICKORE, G.:  
Die beim Strahl-Läppen erzielbaren Oberflächen.  
Werkstatttechnik und Maschinenbau 45 (1955), 591-593
21. DIN 4760:  
Gestaltabweichung: Begriffe, Ordnungssystem.  
Deutsches Institut für Normung, Juni 1982
22. DIN 4768:  
Herstellverfahren der Rauheit von Oberflächen.  
Deutsches Institut für Normung, März 1981
23. DIN 8580:  
Fertigungsverfahren: Einteilung.  
Deutsches Institut für Normung, Juli 1985
24. DIN 8589:  
Fertigungsverfahren: Spanen. Einordnung, Unterteilung, Begriffe.  
Deutsches Institut für Normung, August 1982
25. DREHER, M.:  
Massfinishing.  
Metalloberfläche 49 (1995), 96-98



26. DUNCANSON, M.G.:  
Nonprecious Metal Alloys for Fixed Restorative Dentistry.  
Dent Clin North Am 20 (1976), 423-433
27. EDER, A.; WICKENS, J.:  
Surface treatment of alloys for resin adhesion.  
Quintessenz Int 27 (1996), 35-40
28. EICHNER, K.:  
Einfluss von Brücken-Zwischengliedern auf die Gingiva.  
Dtsch Zahnärztl Z 30 (1975), 639-648
29. EICHNER, K.:  
Klinische Beurteilung dentaler Legierungen.  
Dtsch Zahnärztl Z 40 (1985), 266-272
30. EN ISO 4287:  
Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren.  
Deutsches Institut für Normung, Oktober 1998
31. FAUSS, K.:  
Kugelstrahlen, ein wirtschaftliches Arbeitsverfahren.  
Werkstatt und Betrieb 84 (1951), 42, 54-58
32. FENSTERSEIFER, F.:  
Messtechnische Bewertung von Glanz und Oberflächenreflexion.  
Metalloberfläche 47 (1993), 557-560
33. FINGER, W.:  
Begriffsbestimmungen der Werkstoffprüfung.  
In: EICHNER, K.; KAPPERT, H.F.: Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung Band 1:  
Grundlagen und Verarbeitung. Hüthig Verlag, Heidelberg 1996
34. FISCHBECK, H.; SCHMITT, P.:  
Shotpeening - some outstanding applications.  
Material and Method's 22 (1945), 1064-1069
35. FRISKE, W. H.; PAGE, J.P.:  
Shot peening to prevent the corrosion cracking of austenitic stainless steels.  
Pergamon Press, Oxford 1981 (Tagungsband)
36. FRITZ, H.; SCHULZE, G.:  
Fertigungstechnik.  
VDI Verlag, Düsseldorf 1990
37. GEIS-GERSTORFER, J.:  
Nichtedelmetall-Legierungen.  
In: EICHNER, K.; KAPPERT, H.F.: Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung Band 1:  
Grundlagen und Verarbeitung. Hüthig Verlag, Heidelberg 1996
38. GEIS-GERSTORFER, J.; ECKARDT, M.; WEBER, H.:  
Zur Oberflächenbearbeitung von gegossenem Titan für Kronen und Brücken.  
Dtsch Zahnärztl Z 44 (1989), 882-884

- 
39. GLANTZ, P.O.:  
On wettability and adhesiveness.  
Odontol Revy 20 (1969), 1-132
  40. GRAY, H.:  
Einfluss einer Kugelstrahlbehandlung auf das Ermüdungsverhalten von Titan-Legierungen  
bei höheren Temperaturen.  
DISSERTATION, TU Hamburg-Harburg, 1988
  41. GREINER, A.:  
Kobalt-Chrom-Legierungen - ihre Eigenschaften und Verarbeitung.  
Zahntechnik 20 (1979), 276-283
  42. GRIMM, H.; RECKNAGEL, R.D.:  
Grundkurs Biostatistik.  
Gustav Fischer Verlag, Jena 1985
  43. GRIMM, W. D.; GEORGI, K.:  
Mikrobiell bedingte Plaqueakkumulation an verschiedenen Dentalwerkstoffen.  
Quintessenz 40 (1989), 1133-1141
  44. GRUBER, G.:  
Ein neues Sandstrahlverfahren (Mikrostrahlen) im Vergleich zu anderen  
Oberflächenbearbeitungsmethoden.  
Quintessenz Zahntech 26 (2000), 145-150
  45. HAMMER, M., PREUSS, M.:  
Strahltechnik auf dem Prüfstand.  
Quintessenz Zahntech 26 (2000), 931-937
  46. HERRMANN, H. W.:  
Die Oberfläche von Goldgüssen.  
Dental Labor 26 (1978), 1164-1168
  47. HEUBEL, T.:  
Untersuchungen zum Einsatz des Kugelstrahlverfahrens - shot peening - bei der  
Bearbeitung stomatologischer Legierungen.  
Zahnmedizinische Dissertation, Erfurt 1984
  48. HIERSIG, H. M.:  
Lexikon der Produktionstechnik: Verfahrenstechnik.  
VDI Verlag, Düsseldorf 1995
  49. HOHMANN, W.:  
Qualitätsmerkmale von edelmetallfreien Dentalgusswerkstoffen.  
Quintessenz Zahntech 10 (1984), 93-96
  50. HOMMELWERKE GMBH:  
Betriebsanleitung für den Hommeltester T 1000.  
Schwenningen 1997
  51. HOPP, M.; LANGE, K.P.:  
Titanguss.  
In: WIRZ, J.; BISCHOFF, H.: Titan in der Zahnmedizin. Quintessenz Verlag, Berlin 1997

52. HOPP, M.; MEINKE, E.; SCHMELZER, M.; LANGE, K.P.:  
Besonderheiten des Titangusses im Dentallabor.  
Quintessenz Zahntech 21 (1995), 665-679
53. HOROWITZ, J.:  
Das "shot-peening"-Verfahren.  
Metalloberfläche 33 (1979), 104-111
54. JÄGER, K.; WIRZ, J.:  
Röntgenkontrolle beim Titanguss als Beitrag zur Qualitätssicherung.  
Quintessenz Zahntech 21 (1995), 717-723
55. JEFFERIES, S.:  
The art and science of abrasive finishing and polishing in restorative dentistry.  
Dent Clin North Am 42 (1998), 613-627
56. JENDRESEN, M.; GLANTZ, P.O.:  
Clinical adhesiveness of selected dental materials.  
Acta Odontol Scand 39 (1981), 39-45
57. JUNG, F.; HUPFAUF, L.:  
Reaktionsvermögen des Mundhöhlengewebes auf exogene Faktoren mit klinischen Hinweisen und therapeutischen Vorschlägen.  
Dtsch Zahnärztl Z 16 (1961), 615-624
58. JUNG, T.; BORCHERS, L.:  
Schleif- und Poliermittel.  
In: EICHNER, K.; KAPPERT, H.F.: Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung Band 1: Grundlagen und Verarbeitung. Hüthig Verlag, Heidelberg 1996
59. KAISER, B.:  
Schwingfestigkeitssteigerung durch Kugelstrahlen.  
Korrosionsschutzseminar, Institut für Korrosionsschutz Dresden, Dresden 1993
60. KAPPERT, H.F.:  
Metalllegierungen in der Zahnheilkunde.  
Zahnärztl Mitt 82 (1992), 7, 46-54
61. KAPPERT, H.F.:  
Titan als Werkstoff für die zahnärztliche Prothetik und Implantologie.  
Dtsch Zahnärztl Z 49 (1994), 573-583
62. KAPPERT, H.F.; PFEIFFER, P.; SCHWICKERATH, H.:  
Dentallegierungen auf Nicht-Edelmetall-Basis.  
Zahnärztl Mitt 89 (1999), 2422-2428
63. KASEMO, B.; LAUSCHMA, J.:  
Metallauswahl und Oberflächenbeschaffenheit.  
In: BRANEMARK et al.: Gewebeintegrierter Zahnersatz. Quintessenz Verlag, Berlin 1985
64. KLAPPER, H.U.; GEHRE, G.:  
Einfluss von Gussstruktur und Oberflächenvorbehandlung auf die Verbundfestigkeit bei Titankeramik.  
Dtsch Zahnärztl Z 53 (1998), 728-731

65. KÖNIG, W.:  
Schleifen, Hohnen, Läppen.  
In: KÖNIG, W.; KLOCKE, F.: Fertigungsverfahren. VDI Verlag, Düsseldorf 1996
66. KRAUSE, R.:  
Eigenschaften mechanisch bearbeiteter metallischer Oberflächen.  
Metalloberfläche 9 (1955), 135-140
67. KREKELER, G.; KAPPERT, H.:  
Die Affinität der Plaque zu verschiedenen Werkstoffen.  
Schweiz Monatsschr Zahnmed 94 (1984), 647-651
68. KÜPPER, H.:  
Titan: Ein neuer Dentalwerkstoff für prothetische Restaurationen?  
Zahnärztl Mitt 82 (1992), 7, 56-66
69. KÜRTE, H.:  
Untersuchungen über das rationelle Polieren von Metalllegierungen.  
Dtsch Zahnärztebl 20 (1960), 634-642
70. LEISTNER, E.:  
Automatische Titanpräparation - besser geht's nicht.  
Struers Metallographische Neuheiten, Struktura 17 (1988), 12-13
71. LENZ, E.:  
Statische und dynamische Untersuchungen zum elastischen Verhalten von  
Modellgusslegierungen.  
Dtsch Zahnärztl Z 21 (1966), 955-959
72. LENZ, E.:  
Einsatz und Laboriumstechnologie der Nichtelegierungsmetalllegierungen Teil 1 und 2.  
Stomatologie DDR 35 (1985), 677-685; 721-728
73. LENZ, E.:  
Shot-peening. Eine alternative Oberflächenbearbeitung.  
dental labor 35 (1987), 623-627
74. LENZ, E.:  
Edelmetallfreie Dentallegierungen in der experimentellen Erprobung und im klinischen  
Einsatz.  
Separatdruck Swiss Dent (1990/1991), 19-30
75. LENZ, E.:  
Dentallegierungen.  
In: MEINERS, H.; LEHMANN, K.M.: Klinische Materialkunde für Zahnärzte. Carl Hanser Verlag,  
München 1998
76. LENZ, E.:  
Klinische Bewertung von Dentallegierungen.  
teamwork 3 (2000), 337-359
77. LENZ, E.; DIETZ, W.:  
Die Randschichten von Titangussobjekten unter dem Einfluss verschiedener Einbettmassen.  
Quintessenz Zahntechnik 21 (1995), 633-645

78. LENZ, E.; LENZ, U.:  
Studie zum Einsatz einer Titan-Aluminium-Niob-Legierung in der zahnärztlichen Prothetik.  
Quintessenz Zahntech 28 (2002), 122-134
79. LENZ, E.; MANN, E.:  
Der Einfluss verschiedener Oberflächenzustände und Milieubedingungen auf das elektrochemische Verhalten von edelmetallreduzierten und edelmetallfreien Legierungen.  
Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde 73 (1985), 471-476
80. LENZ, E.; LENZ, U.; RASER, G.:  
Fortschritte in der Titantechnologie.  
Quintessenz Zahntech 26 (2000), 1303-1315
81. LENZ, E.; MELLE, B.; LIEFEITH, K.; HILDEBRAND, G.; KRAFT, D.:  
Der Einfluss simulierter Bedingungen des Mundmilieus auf das in vitro-Korrosionsverhalten metallischer Dentalwerkstoffe.  
Swiss Dent 16 (1995), 12, 5-13
82. LENZ, U.; RASER, G.; LENZ, E.:  
Verbesserte Oberflächenqualität von Dentallegierungen und Titan.  
dental labor 49 (2001), 685-698
83. LINDIGKEIT, J.; MÜLLER, M.:  
Bedeutung der Oberflächenrauigkeit in der Metall-Keramik - dargestellt am Beispiel der CoCr-Aufbrennlegierung Dentitan.  
Quintessenz Zahntech 10 (1984), 11, 1-6
84. LUBBERICH, A.C.:  
Titantechnologie für festsitzenden und kombinierten Zahnersatz.  
Quintessenz Zahntech 21 (1995), 585-601
85. LUDWIG, K.:  
Legierungen in der Zahnärztlichen Therapie, Teil V: NEM-Legierungen.  
Dentalspiegel 14 (1994), 5, 30-41
86. LUDWIG, K.:  
Metall-Kunststoff-Verbundsysteme.  
In: EICHNER, K.; KAPPERT, H.F.: Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung Band 1: Grundlagen und Verarbeitung. Hüthig Verlag, Heidelberg 1996
87. MAASS, P.; PEISSKER, P.:  
Oberflächenvorbehandlung und metallische Beschichtung.  
Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1985
88. MAASS, W. B.:  
Oberflächenvorbereitung auf neuen Wegen.  
Metalloberfläche 35 (1981), 144-145
89. MARX, R.; BAUMANN, W.:  
Adhäsive Haftung von Kunststoff und Keramik auf Titan für die Verblendung und für Adhäsivrestorationen.  
Quintessenz Zahntech 18 (1992), 1475-1497

90. MARXKORS, R.:  
Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde.  
Carl Hanser Verlag, München 1988
91. MOHAMMED, H.; ASGAR, K.:  
A new dental superalloy system: 1. theory and alloy design.  
J Dent Res 52 (1973), 136-144
92. MÜLLER, M.P.; VERPOORT, C.; GESSINGER, G.H.:  
The influence of shot peening on fatigue and corrosion fatigue behaviour of an austenitic-ferric stainless steel.  
Pergamon Press, Paris 1981 (Tagungsband)
93. NEUMEYER, S.:  
Zur Erleichterung der Ausarbeitung von Metallkaufächen mit Hilfe des Hartmetallfinierers H 500  
Quintessenz Zahntech 10 (1984), 769-772
94. OTT, W.H.R.:  
Strahlkabinen und Strahlkabinentechnik zur Substratbehandlung.  
Metalloberfläche 33 (1979), 506-512
95. PÄSSLER, K.; MANN, E.:  
Der dentale Titanguss-Grundlagen, Technologie und werkstoffkundliche Bewertung.  
Quintessenz Zahntech 17 (1991), 717-726
96. PÄSSLER, K.; BESTELMEYER, F.; OHNMACHT, P.; SERNETZ, F.:  
Einflüsse auf die Qualität und Eigenschaften von dentalen Titangüssen.  
dental labor 39 (1991), 809-815
97. PETZOLD, J.:  
Zur Bestimmung des Glanzes metallischer Oberflächen.  
Metalloberfläche 32 (1978), 542-545
98. PEUTZFELD, A.; ASSMUSSEN, E.:  
Distortion of alloy by sandblasting.  
Am J Dent 9 (1996), 2, 65-66
99. PRÖBSTER, L.:  
Werkstoffkundeatlas: Titan.  
Quintessenz Zahntech 16 (1990), 699-704
100. PUHAR, M.; EGLI, A.:  
Oberflächenrauigkeit zahnärztlicher Materialien in graphischer Darstellung.  
Schweiz Monatsschr Zahnmed 77 (1967), 1013-1028
101. QUIRYEN, M.; BOLLEN, C.M.D.:  
The influence of surface roughness and surface free energy on supra- and subgingival plaque formation in man.  
J Clin Periodontol 22 (1995), 1-14
102. QUIRYEN, M.; MARECHAL, M.; BUSSCHER, H.; WEERKAMP, A.H.; DARIUS, P.L.; VAN STEENBERGHE, D.:  
The influence of surface free energy and surface roughness on early plaque formation.  
J Clin Periodontol 17 (1990), 138-144

103. RINGKE, S.; PATYK, A.; KOBES, L. W. R.:  
Untersuchungen zur Passgenauigkeit von Reintitan-Gussobjekten.  
Dtsch Zahnärztl Z 47 (1992), 509-511
104. ROMETSCH, R.; LETZNER, R. D.:  
Rauheitsmessung: Theorie und Praxis.  
Hommelwerke GmbH, Schwenningen 1993
105. RÜB, F.:  
Strahlmittel, Strahlverfahren und -anlagen.  
Metalloberfläche 23 (1969), 262-265
106. RÜDINGER, K.:  
Titan, Titan-Legierungen und Titan-Verbindungen.  
In: Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, Bd. 23, 267-292, Verlag Chemie,  
Weinheim 1983
107. RUSTERHOLTZ, R.:  
Shot-peening: Verformen und Vergüten mit höchster Präzision.  
Metalloberfläche 45 (1991), 269-271
108. SANDIG, H.-CH.; ENDERT, G.:  
Untersuchung über die Adhäsionseigenschaften stomatologischer Legierungen in  
Abhängigkeit vom Bearbeitungszustand.  
Zahn Mund Kieferheilk 71 (1983), 463-469
109. SCHAT, W.:  
Einführung in die Werkstoffwissenschaft.  
Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1991
110. SCHMIDLI, F.; MEDER, M.; WIRZ, J.:  
Politur von Titanwerkstücken.  
Quintessenz Zahntech 23 (1997), 55-63
111. SCHMIDT, R.:  
Werkstoffverhalten in biologischen Systemen..  
VDI-Verlag, Düsseldorf 1993
112. SCHOLTES, G.:  
Veränderungen in den Randschichten metallischer Werkstoffe durch Kugelstrahlen.  
Korrosionsschutzseminar, Institut für Korrosionsschutz Dresden, Dresden 1993
113. SCHRÖDER, F.:  
Kugelstrahlen, ein wertvolles neues Verfahren der Oberflächenveredlung von Metallen.  
Metalloberfläche 2 (1947), 1, 87
114. SCHUMANN, H.:  
Metallographie.  
Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie GmbH, Leipzig 1990
115. SCHÜTZ-DENTAL GMBH:  
Betriebsanleitung Ecoclean.  
Rosbach 1997

116. SCHWICKERATH, H.:  
Beanspruchung und Anforderung an die Materialeigenschaften dentaler Legierungen.  
Dtsch Zahnärztl Z 40 (1985), 243-253
117. SCHWICKERATH, H.:  
Die Bedeutung der mechanischen Eigenschaften von Dentallegierungen.  
Quintessenz Zahntech 19 (1993), 285-291
118. SHERIF, A.H.; EL MAHASSEN BADAWI, B.A.; EL SAYED, S.M.:  
Biological influence of some crown and bridge restorative materials finished and polished by different techniques.  
Egyp Dent J 39 (1993), 559-568
119. SIMON, H.:  
Oberflächenreaktionen an Titanwerkstoffen.  
Metalloberfläche 36 (1982), 211-217
120. SIMON, H.; THOMA, M.:  
Angewandte Oberflächentechnik für metallische Werkstoffe.  
Carl Hanser Verlag, München 1989
121. SPEIDEL, M.O.:  
Effect of shot peening on stress corrosion, cracking and corrosion fatigue.  
Pergamon Press, Paris 1981 (Tagungsband)
122. STARKER, M.:  
Untersuchungen explantierter kugelgestrahlter Osteosyntheseplatten.  
Z Orthop 124 (1986), 350-354
123. STARKER, M.:  
Das Kugelstrahlen zur Qualitätsverbesserung von Osteosyntheseplatten.  
Habilitationsschrift, Universität Frankfurt, 1989
124. STRIETZEL, R.:  
Quintessenz der Dentallegierungen.  
Quintessenz Zahntech 24 (1998), 481-485
125. STÜMKE, M.:  
Edelmetall-Legierungen.  
In: EICHNER, K.; KAPPERT, H.F.: Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung Band 1:  
Grundlagen und Verarbeitung. Hüthig Verlag, Heidelberg 1996
126. SWARTZ, M.L.; PHILIPPS, R.W.:  
Comparison of bacterial accumulation on rough and smooth enamel surfaces.  
J Periodontol 28 (1957), 304-307
127. SWINKELS, H.:  
Das Strahlen von Metalloberflächen.  
Metalloberfläche 40 (1986), 315-316
128. TAYLOR, R.; MARYAN, CH.; VERRAN, J.:  
Retention of oral microorganism on cobalt-chromium alloy and dental acrylic resin with different surface finishes.  
J Prosthet Dent 80 (1998), 592-597



129. THOMA, M.:  
Oberflächentechnik von Titan (1-3).  
Metalloberfläche 36 (1982), 134-143; 218-226; 613-620
130. TILLER, H.J.; MAGNUS, B.; GÖBEL, R.; MUSIL, R.; GARSCHKE, A.:  
Der Sandstrahlprozess und seine Einwirkung auf den Oberflächenzustand von Dentallegierungen (I und II).  
Die Quintessenz 36 (1985), 1927-1934; 2151-2158
131. VAN DIJK, J.; HERKSTRÖTER, F.; BUSSCHER, H.; WEERKAMP, A.; JANSEN, H.; ARENDS, J.:  
Surface-free energy and bacterial adhesion. AN in vivo study in beagle dogs.  
J Clin Periodontol 14 (1987), 300-304
132. VOSS, N.:  
Die Oberflächenbearbeitung von gegossenem Titan mit rotierenden Instrumenten - experimentelle Untersuchungen zum Nachweis optimaler Hilfsmittel und Methoden.  
Zahnmedizinische Dissertation, Jena 2002
133. WAGNER, L.:  
Der Einfluss von Kugelstrahlen auf das Ermüdungsverhalten hochfester Titanlegierungen.  
Dissertation, Ruhr-Universität, Bochum 1981
134. WALL, G.:  
Erfolg und Misserfolg mit edelmetallfreien Legierungen.  
Zahntechnik (1998), 6, 20-26
135. WATAHA, J.C.:  
Biocompatibility of dental casting alloys: a review.  
J Prosthet Dent 83 (2000), 223-234
136. WECK, E.; LEISTNER, E.:  
Metallographische Anleitung zum Farbätzen nach dem Tauchverfahren (III).  
Deutscher Verlag für Schweißtechnik GmbH(DVS), Düsseldorf 1986
137. WEIKART, P.:  
Die Oberfläche von Metallen und ihre Abhängigkeit von der Bearbeitung.  
Dtsch Zahnärztl Z 9 (1960), 549-561
138. WEINGRABER, H. VON:  
Handbuch Technische Oberfläche.  
Friedr. Vieweg & Sohn Verlags-GmbH, Braunschweig 1989
139. WELKER, D.:  
Das biologische Risiko zahnärztlicher Werkstoffe.  
In: WIRZ, J.: Restaurative Zahnmedizin 200X. Quintessenz Verlag, Berlin 2001
140. WIRZ, J.:  
Materialbedingte Erkrankungen.  
In: WIRZ, J.: Klinische Material- und Werkstoffkunde. Quintessenz Verlag, Berlin 1993
141. WIRZ, J.:  
Zahnärztliche Legierungen.  
In: WIRZ, J.: Klinische Material- und Werkstoffkunde. Quintessenz Verlag, Berlin 1993

142. WIRZ, J.:  
Titan - ein Werkstoff der modernen Prothetik.  
Quintessenz 45 (1994), 731-739
143. WIRZ, J.:  
Basler Lehrmeinung zur Anwendung von Metallen und Legierungen in der Mundhöhle.  
Quintessenz 46 (1995), 393-398
144. WIRZ, J.; BISCHOFF, H.:  
Titan in der Zahnmedizin.  
Quintessenz Verlags GmbH, Berlin 1997
145. WIRZ, J.; JÄGER, K.; GRONDE, V.:  
Kronen und Brücken mit Titangerüsten .  
Quintessenz 45 (1994), 849-860
146. WIRZ, J.; JÄGER, K.; SCHMIDLI, F.; MEDER, M.:  
Titan - ein Werkstoff für die Teil- und Hybridprothetik.  
Quintessenz Zahntech 21 (1995), 567-582
147. WISE, M.D.; DYKEMA, R.W.:  
The plaque retaining capacity of four dental materials.  
J Prosthet Dent 33 (1975), 178-190
148. YAMAUCHI, M.; YAMAMOTO, K.; WAKABAYASHI, M.; KAWANO, J.:  
In vitro adherence of microorganisms to denture base resin with different surface texture.  
Dent Mater J 9 (1990), 19-24
149. ZIELER, W.:  
Einsatzmöglichkeiten des Strahlverfahrens und Auswahl der geeigneten Strahlmittel.  
Metalloberfläche 17 (1963), 23-26
150. ZIELER, W.; LEPAND, H.:  
Strahlen und Strahlmittel.  
Carl Hanser Verlag, München 1964
151. ZWICKER, U.:  
Titan und Titanlegierungen.  
In: KÖSTER, W.: Reine und angewandte Metallkunde in Einzeldarstellungen. Springer-Verlag, Berlin 1974

Tab. A: Ergebnisse der Profiluntersuchung von Degudent H, Remanium GM380 und Titan vor und nach Bearbeitung mit Micro-Finishing

	R <sub>zD</sub> Stabw		R <sub>a</sub> Stabw		R <sub>t</sub> Stabw		S <sub>m</sub> Stabw	
DEGUDENT H								
Guss	9,72	2,3	1,83	0,63	13,98	4,16	47,89	15,57
+SM1	10,71	3,66	2,34	0,85	16,5	4,84	89,36	19,52
+SM2	8,29	1,44	1,7	0,31	11,63	2,23	72,22	15,94
+SM1+2	9,75	2,04	2,08	0,5	14,39	2,8	76,83	15,72
SiC220	3,61	0,65	0,53	0,1	4,92	1,15	20,03	3,83
+SM1	4,19	0,54	0,69	0,11	5,89	1,42	28,87	2,88
+SM2	5,19	0,56	0,93	0,12	6,87	0,85	36,75	4,49
+SM1+2	3,91	0,47	0,63	0,09	4,95	0,62	29,66	5,62
SiC600	1,33	0,26	0,18	0,03	1,87	0,51	16,6	1,08
+SM2	3,89	0,35	0,71	0,07	4,9	0,65	35,08	5,42
SiC1200	0,88	0,24	0,12	0,04	1,15	0,37	13,73	1,42
+SM2	5,54	0,77	1,02	0,14	7,12	0,15	45,75	7,86
REMANIUM GM380								
Guss	19,9	3,53	3,84	0,52	28,19	6,2	76,64	22,18
+SM1	5,7	1,2	1,23	0,32	7,64	1,58	60,78	16,81
+SM2	7,97	2,43	1,72	0,53	10,97	2,93	102,06	18,23
+SM1+2	5,01	1,09	1,18	0,25	7,8	1,54	108,81	27,67
SiC220	1,06	0,1	0,16	0,01	1,3	0,33	6,25	0,46
+SM1	2,15	0,42	0,32	0,06	2,76	0,72	11,71	1,45
+SM2	1,41	0,21	0,23	0,03	1,97	0,45	34,95	4,91
+SM1+2	1,33	0,08	0,23	0,02	1,92	0,27	38,26	5,57
SiC600	0,67	0,15	0,11	0,01	0,87	0,3	22,44	3
+SM2	1,37	0,26	0,22	0,03	2,29	0,73	33,02	4,54
SiC1200	1,01	0,2	0,15	0,02	1,37	0,33	10,03	6,71
+SM2	1,29	0,17	1,19	0,02	1,66	0,29	8,39	0,74
TITAN								
Guss	10,66	1,94	2,12	0,43	16,48	4,22	50,22	8,09
+SM1	5,93	2,62	1,39	0,61	9,5	3,7	87,65	56,97
+SM2	7,01	1,63	1,67	0,45	10,96	2,54	117,63	29,19
+SM1+2	6,82	2,27	1,67	0,54	12,07	3,96	122,8	58,76
SiC220	1,14	0,12	0,16	0,02	1,49	0,23	13,99	4,84
+SM1	2,32	0,38	0,36	0,04	2,87	0,39	19,12	0,96
+SM2	1,96	0,33	0,31	0,06	2,55	0,51	19,06	3,28
+SM1+2	2,17	0,48	0,37	0,1	3,09	0,9	36,78	10,89
SiC600	1,1	0,21	0,15	0,03	1,5	0,26	16,48	1,97
+SM2	2,44	0,45	0,43	0,07	3,24	0,71	39,6	6,1
SiC1200	0,88	0,09	0,12	0,01	1,19	0,29	15,62	1,74
+SM2	2,35	0,36	0,41	0,08	2,96	0,45	41,43	6,3

Tab. B: Ergebnisse der Mikrohärteprüfungen in unterschiedlichen Tiefen an Prüfkörpern von Degudent H, Remanium GM380 und Titan vor und nach Micro-Finishing

<b>DEGUDENT H</b>	<i>Guss</i>		<b>+SM1</b>		<b>+SM2</b>		<b>+SM1+2</b>	
Entfernung vom Rand	Stabw		Stabw		Stabw		Stabw	
10 µm	200	12,54	183	15,15	194	12,01	196	6,2
20 µm	184	11,75	190	10,05	187	13,36	182	12,58
50 µm	186	5,8	184	10,34	185	9,31	188	5,31
100 µm	186	10,87	187	5,68	188	9,41	190	8,45
200 µm	189	9,02	190	8,45	189	10,19	183	11,18
Mitte	191	7,67	181	6,03	194	7,38	189	9,02

<b>REMANIUM GM380</b>	<i>Guss</i>		<b>+SM1</b>			<b>+SM1+2</b>	
Entfernung vom Rand	Stabw		Stabw			Stabw	
10 µm	507	35,78	558	70,27		715	54,42
20 µm	502	32,07	453	55,91		616	58
50 µm	516	43,82	428	47,06		499	76,56
100 µm	494	47	401	48,92		436	70,83
200 µm	551	64,42	453	98,53		439	66,4
Mitte	517	40,05	504	73,79		509	79,01

<b>TITAN</b>	<i>Guss</i>		<b>+SM1</b>		<b>+SM2</b>		<b>+SM1+2</b>	
Entfernung vom Rand	Stabw		Stabw		Stabw		Stabw	
10 µm	1256	316,62	859	219,63	591	156,46	671	145,1
20 µm	908	214,44	702	214,17	643	226,38	536	146,18
50 µm	488	65,27	401	32,59	406	76,08	578	92,45
100 µm	282	50,81	252	30,25	233	16,4	294	34,96
200 µm	214	20,16	228	19,69	252	26,09	220	24,55
Mitte	222	15,28	211	28,31	258	18,49	227	23,21

<b>TITAN-vorgeschliffen-</b>	<i>SiC220</i>		<b>+SM1</b>		<b>+SM2</b>		<b>+SM1+2</b>	
Entfernung vom Rand	Stabw		Stabw		Stabw		Stabw	
10 µm	n.messbar		288	40,85	376	36,68	482	62,88
20 µm	239	26,05	294	31,68	295	39,86	452	34,5
50 µm	205	21,22	275	65,66	255	28,9	327	18,93
100 µm	211	15,88	278	42,42	257	27,45	231	21,95
200 µm	201	16,95	235	35,14	271	24,98	227	16,15
Mitte	205	28,42	267	24,48	244	15,67	219	9,88

<b>TITAN-vorgeschliffen-</b>	<i>SiC600</i>		<b>+SM2</b>		<i>SiC1200</i>		<b>+SM2</b>	
Entfernung vom Rand	Stabw		Stabw		Stabw		Stabw	
10 µm	196	19,49	445	31,91	n.messbar		302	54,88
20 µm	229	30,85	295	38,91	157	25,7	329	32,83
50 µm	243	20,76	270	18,66	195	23,31	294	34,24
100 µm	266	28,18	243	16,28	187	25,96	234	31,96
200 µm	265	18,83	260	22,8	186	17,5	237	19,12
Mitte	244	18,04	235	20,09	183	22,62	240	30,59

Tab. C: Ergebnisse der Profiluntersuchung von Degudent H, Remanium GM380 und Titan vor und nach Bearbeitung mit Ecoclean

	R <sub>zD</sub> Stabw		R <sub>a</sub> Stabw		R <sub>t</sub> Stabw		S <sub>m</sub> Stabw	
DEGUDENT								
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,79	1,22	1,86	0,21	14,46	2,19	39,69	4,26
+GB II	7,06	1,45	1,61	0,34	11,17	3,24	113,2	32,13
SiC220	3,61	0,65	0,53	0,1	4,92	1,15	20,03	3,83
+GB II	2,13	0,39	0,37	0,07	2,83	0,33	44,53	17,47
SiC600	1,33	0,26	0,18	0,03	1,87	0,51	16,6	1,08
+GB II	1,73	0,6	0,32	0,14	2,42	0,95	61,24	24,88
SiC1200	0,88	0,24	0,12	0,11	1,15	0,37	13,73	1,42
+GB II	1,74	0,67	0,28	0,13	2,55	1,11	32,62	19,33
REMANIUM GM380								
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,71	0,92	1,33	0,18	10,37	1,57	34,72	3,96
+GB I	5,38	0,9	0,98	0,2	7,15	1,31	51,42	16,14
+GB I+II	5,39	0,5	0,89	0,09	7,37	0,83	43,37	4,77
SiC220	1,19	0,26	0,21	0,03	1,7	0,16	24,68	5,66
+GB I	0,85	0,28	0,15	0,03	1,11	0,44	26,9	3,27
+GB I+II	1,04	0,3	0,17	0,04	1,41	0,48	17,39	2,25
SiC600	0,38	0,06	0,08	0,03	0,59	0,19	31,79	8,04
+GB II	0,5	0,07	0,1	0,01	0,75	0,23	46,61	11,95
SiC1200	0,35	0,03	0,07	0,01	0,45	0,06	41,78	10,77
+GB II	0,55	0,06	0,1	0,01	0,82	0,21	46	11,17
BIOTAN								
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,65	1,41	1,33	0,21	10,48	2,7	35,36	6,04
+GB I	6,36	0,88	1,15	0,13	8,37	1,4	38,43	6,54
+GB I+II	5,4	0,6	1,06	0,1	7,51	0,21	63,04	13,29
SiC220	1,72	0,33	0,25	0,04	2,47	0,47	21,39	2,32
+GB I	4,83	1,1	0,98	0,26	7,07	1,8	69,32	15,14
+GB I+II	5,16	1,04	1,05	0,22	7,42	1,23	79,75	20,63
SiC600	1,24	0,17	0,18	0,01	1,67	0,23	17,08	2,27
+GB II	1,17	0,24	0,19	0,04	1,44	0,35	23,74	6,62
SiC1200	0,85	0,13	0,13	0,01	1,05	0,22	17,75	3,04
+GB II	0,96	0,19	0,2	0,04	1,43	0,32	46,82	14,77

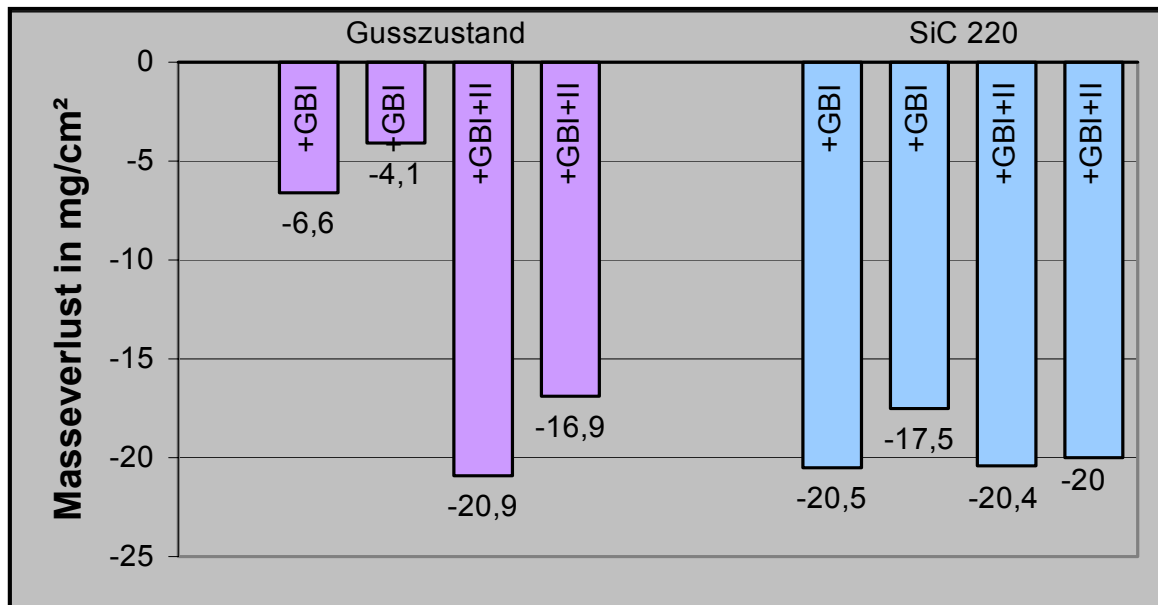


Abb. D: Darstellung des Masseverlustes von Titan nach der Bearbeitung mit dem Ecoclean-Verfahren. Die Messungen der mit Alkohol gereinigten und getrockneten Prüfkörper erfolgten vor und nach der Bearbeitung mittels der Satorius Analysenwaage MC1. Die Gewichts Differenz wurde anschließend auf die jeweilige Prüfkörperoberfläche umgerechnet.  
GB I = Beizbad (I), GB II = Reinigungsbad (II)

## **Ehrenwörtliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass mir die Promotionsordnung der Medizinischen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität bekannt ist,

ich die Dissertation selbst angefertigt habe und alle von mir benutzten Hilfsmittel, persönliche Mitteilungen und Quellen in meiner Arbeit angegeben sind,

mich folgende Personen bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes unterstützt haben: Herr Prof. Dr. Lenz, Herr DI Raser, Frau Riese, Herr Dipl.-Phys. Dietz,

die Hilfe eines Promotionsberaters nicht in Anspruch genommen wurde und dass Dritte weder unmittelbar, noch mittelbar geldwerte Leistungen von mir für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen,

dass ich die Dissertation noch nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht habe und

dass ich die gleiche, eine in wesentlichen Teilen ähnliche oder eine andere Abhandlung nicht bei einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht habe.

Jena, den

## **Danksagung**

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Dr. E. Lenz für die freundliche Überlassung des Themas meiner Dissertation sowie für die gewährte fachliche Beratung und moralische Unterstützung bei der Bearbeitung bedanken.

Des weiteren gilt mein Dank Herrn Dipl.-Ing. G. Raser für die Hilfe und Unterstützung bei den experimentellen, speziell metallographischen Untersuchungen, Frau R. Riese für die Unterstützung bei der Digitalisierung der Abbildungen und Herrn Dipl.-Phys. W. Dietz für die Durchführung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen und mikroanalytischen Untersuchungen.

Ebenfalls möchte ich meinen Eltern und Geschwistern für die moralische Unterstützung und Bereitstellung der Computertechnik zur Herstellung des Manuskriptes danken.



**Lebenslauf**

Name	Ulrike Lenz	
Geburtsdatum	11.09.1974	
Geburtsort	Jena	
Eltern	Prof. em. Dr. Edwin Lenz, geb. 25.12.1933 Barbara Lenz, geb. Heisig, geb. 07.11.1937	
Familienstand	ledig	
Ausbildung	01.09.1981- 31.08.1990	Allgemeinbildende Polytechnische Oberschule "Heinrich Heine" in Erfurt
	01.09.1990- 28.06.1993 28.06.1993	5.Staatliches Gymnasium "Heinrich Mann" in Erfurt Erlangen der Hochschulreife (Abitur)
	01.10.1993- 12.01.1999 26.03.1996	Studium der Zahnmedizin an der Friedrich Schiller Universität Jena Zahnärztliche Vorprüfung
	22.01.1999	Approbation als Zahnärztin
	01.03.1999- 28.02.2002	Assistenz Zahnärztin an der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde der Friedrich Schiller Universität Jena Tätigkeit im Vorklinischen und Klinischen Bereich

**Alternative Verfahren zur Oberflächenbearbeitung metallischer  
Dentalmaterialien. Experimentelle Untersuchung zum Einfluss auf  
Oberflächenzustand und Mikrostruktur.**

**THESEN ZUR DISSERTATION**

zur Erlangung des akademischen Grades  
doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)

vorgelegt dem Rat der Medizinischen Fakultät  
der Friedrich - Schiller - Universität Jena

von Ulrike Lenz  
geboren am 11.09.1974 in Jena

## THESEN

1. Metallische Dentalmaterialien sind in der Zahnmedizin unverzichtbare Werkstoffe zur Herstellung von festsitzendem, abnehmbarem und kombiniertem Zahnersatz. Die individuelle Formgebung erfolgt durch Vergießen des schmelzflüssigen Metalls. Die dabei entstehenden Oberflächen bedürfen einer weiterführenden Bearbeitung, um den klinischen Anforderungen (passives Grenzflächenverhalten) gerecht zu werden.
2. Die Gussstruktur und die durch herkömmliches Korundstrahlen bearbeitete Oberfläche zeigen Oberflächenstörungen, welche durch herkömmliche Bearbeitung mit rotierenden Instrumenten nur mit großem Aufwand und nicht immer vollständig beseitigt werden können. Restdefekte können negative Auswirkungen auf das Grenzflächenverhalten (Plaqueeakkumulation, Korrosion) haben.
3. Das Grenzflächenverhalten metallischer Werkstoffe im Mundmilieu kennzeichnet deren Biokompatibilität und kann durch die Oberflächenbeschaffenheit (Korrosionsverhalten, Härte, Oberflächenenergie) und Oberflächengeometrie (Makro- und Mikrorauigkeit) charakterisiert werden. Beide, insbesondere die Oberflächengeometrie, stellen ursächliche Faktoren für die Bioadhäsion (Biofilmbildung) dar und nehmen mittelbar auf die Biokompatibilität Einfluss.
4. Der ideale Oberflächenzustand soll auf einem rationellen und gut reproduzierbaren Bearbeitungsweg hergestellt werden können (=funktionelles Finishing). Die dazu in der Industrie verwendeten Technologien sind vorwiegend automatische und halbautomatische (nicht manuelle) Verfahren der Oberflächenbearbeitung mit unterschiedlichen Trägermedien (Trocken/Nass) und verschiedenen Beschleunigungsmustern (Druckluft/Zentrifugalkraft/Magnetfeld).
5. Aus der industriellen Technologie wurden ein Mikrotrockenstrahlverfahren (Micro-Finishing) und ein magnet-abrasives Nassverfahren (Ecoclean) in die dentale Technologie übernommen und auf den Markt gebracht. Diese alternativen Bearbeitungsmethoden sind bisher noch nicht wissenschaftlich bewertet worden.
6. Gegenstand der vorliegenden Arbeit war es, diese neuen Verfahren der nicht manuellen Bearbeitung experimentell zu erproben und deren resultierende Oberflächenqualität und Mikrostruktur auf drei typische in der Zahnmedizin verwendete metallische Dentalmaterialien zu untersuchen.

7. Durch Einsatz einer hochgoldhaltigen Legierung, einer Kobaltbasislegierung und Titan in verschiedenen Oberflächenzuständen (Gusszustand, korundgestrahlt [110µm], Nassschliff mit SiC-Papier der Körnungen 220, 600, 1200) sind unterschiedliche Schritte der herkömmlichen Oberflächenbearbeitung bei praxisrelevanten metallischen Dentalmaterialien simulierbar. Die Bearbeitung mit den beiden alternativen Verfahren stellt die Grundlage für die anschließende vergleichende Bewertung dar.
8. Die Oberflächenzustände im Ausgangszustand und nach dessen Bearbeitung können durch metrisch erfassbare Größen (Profilographie, Lichtreflexionsvermögen, Mikrohärte) und bildgebenden Verfahren (Lichtmikroskopie, Rasterelektronenmikroskopie, Metallographie) objektiv beschrieben werden. Dabei zeigt sich die Kombination aus Profilographie, Rasterelektronenmikroskopie und Metallographie als sehr aussagefähig.
9. Im Ergebnis vorliegender Untersuchungen zeigt das Mikrostrahlverfahren **Micro-Finishing** eine sehr gute Effizienz. Die Kombination von schonendem mikrokristallinen Strahlen und nachfolgendem Verdichten und Glätten erzielt eine gut reproduzierbare Oberflächenqualität, die nur einer gering aufwändigen Nachbearbeitung bedarf. Es ergeben sich vom Ausgangszustand abhängige und materialspezifische Empfehlungen für die praktische Anwendung.
10. Das magnet-abrasive Nassverfahren **Ecoclean** zeigt eine geringere Effektivität. Bei der Kombination von chemisch-erosiven Prozessen (Beizbad, Reinigungsbad) und mechanischem Einfluss der Glanznadeln ergeben sich eine materialspezifische Wirkung und vom Ausgangszustand abhängige Unterschiede der Oberflächenqualität.
11. **Hochgoldhaltige Legierungen** sollen nach dem Vergießen nicht durch abrasives Strahlen gereinigt werden. Ausreichend ist eine schonende Entfernung der Einbettmasse im Ultraschallbad oder durch Absäuern. Durch nachfolgendes Shot Peening (Anwendung des Kugelstrahlmittels [2] des Micro-Finishing) kann die Oberfläche eingeebnet und geglättet werden; sie ist somit für die nachfolgende Politur optimal vorbereitet. Die Anwendung des Reinigungsbades II (Ecoclean) reicht als alleinige Bearbeitung nach dem Guss nicht aus. Es ist optional nach dem Kugelstrahlen einzusetzen und bewirkt bei vorgeschliffenen Oberflächen (Formkorrekturen) einen günstigen Ausgangszustand für die nachfolgende Politur. Vorgeschliffene Oberflächen sollten nicht mehr gestrahlt werden.

12. Zur Entfernung der Einbettmassereste und der Gushaut sollen **Kobaltbasislegierungen** abrasiv mit feinkristallinem Strahlmittel (bis 50µm, Strahlmittel 1 des Micro-Finishing) gestrahlt werden. Nachfolgendes Kugelstrahlen verdichtet und glättet die Oberfläche und erzielt eine optimale Oberflächenqualität für die anschließende Politur. Das Ecoclean-Verfahren ist für die gegossene Oberfläche von Kobaltbasislegierungen nicht invasiv genug, um die Oberflächenqualität wirksam zu verbessern. Nach grobem Vorschleiff (Formkorrektur) bewirken das Kugelstrahlen und das Ecoclean-Verfahren eine geringgradige Verbesserung, während beide Verfahren bei der fein ausgearbeiteten Oberfläche nicht mehr angewendet werden sollen.

Gussobjekte aus **Titan** erfordern abrasives Strahlen, um aufgesinterte Fremdstoffe zu entfernen und die Sauerstoffdiffusionsschicht ( $\alpha$ -case) zu reduzieren. Das abrasive Mikrostrahlen stellt hierzu ein wirksames und materialschonendes Verfahren dar. Anschließendes Mikrokugelstrahlen glättet die verbliebene Reaktionsschicht ohne Deformation des tieferliegenden Gefüges und erzielt eine gute Grundlage für die Politur. Das aggressive Beizbad I des Ecoclean bewirkt einen unkontrolliert-invasiven Abtrag der Titanoberfläche und ist daher nicht zu empfehlen. Das nicht invasive Reinigungsbad II des Ecoclean zeigt eine zu geringe Effizienz. Nach vorhergegangener (grober) Formkorrektur empfiehlt sich das Kugelstrahlen der Oberfläche zur Verdichtung und Glättung, wobei aber mikrokristalline Störungen auftreten können, deren klinische Relevanz noch nicht geklärt ist.

In der abschließenden Bewertung stellt das Micro-Finishing eine effektive, nicht manuelle und daher gut reproduzierbare Methode der Oberflächenbearbeitung dar. Insbesondere bei den in ihrer Bearbeitung aufwändigen Materialien (Kobaltbasislegierungen und Titan) erfolgt eine Rationalisierung der Bearbeitungskaskade bei Verbesserung der Oberflächenqualität.

Das Ecoclean-Verfahren zeigt seine größte Effizienz bei der Bearbeitung hochgoldhaltiger Legierungen, während es in der Gesamtwertung dem Micro-Finishing unterliegt. Es kann lediglich zur zusätzlichen Anwendung als Reinigungs- oder Glanzverfahren empfohlen werden.